

Schimmelpfennig, Sonja (Ed.) et al.

Working Paper

Bewässerung in der Landwirtschaft - Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg

Thünen Working Paper, No. 85

Provided in Cooperation with:

Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries

Suggested Citation: Schimmelpfennig, Sonja (Ed.) et al. (2018) : Bewässerung in der Landwirtschaft - Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg, Thünen Working Paper, No. 85, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, <http://dx.doi.org/10.3220/WP1515755414000>

This Version is available at:
<http://hdl.handle.net/10419/173254>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Bewässerung in der Landwirtschaft

Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg

Sonja Schimmelpfennig, Jano Anter, Claudia Heidecke, Stefan Lange
Klaus Röttcher, Florian Bittner (Hrsg.)

Thünen Working Paper 85

Dr. Sonja Schimmelpfennig, Dr. Claudia Heidecke
Thünen-Institut für Ländliche Räume
Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
Bundesallee 64
D-38116 Braunschweig

Telefon: +49 531 596-5213
Fax: +49 531 596-5599
E-Mail: sonja.schimmelpfennig@thuenen.de

Stefan Lange
Forschungskoordination
Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
Bundesallee 50
D-38116 Braunschweig

Jano Anter
Thünen-Institut für Agrartechnologie
Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
Bundesallee 47
D-38116 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher
Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Campus Suderburg
Herbert-Meyer-Straße 7
D-29556 Suderburg

Dr. Florian Bittner
Julius Kühn-Institut - Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen
Forschungskoordination
Erwin-Baur-Str. 27
D-06484 Quedlinburg

Thünen Working Paper 85

Braunschweig/Deutschland, Januar 2018

Zusammenfassung

Am 11. und 12. September 2017 fand an der Ostfalia Hochschule, Campus Suderburg, eine vom Thünen-Institut, dem Julius-Kühn Institut und der Ostfalia Hochschule gemeinsam organisierte Fachtagung zum Thema „Bewässerung in der Landwirtschaft“ statt. Dazu wurden deutschlandweit Experten des Fachgebiets Bewässerung eingeladen, aktuelle Einschätzungen zur Entwicklung des Bewässerungsbedarfs und der Bewässerungswürdigkeit verschiedener Kulturen an unterschiedlichen Standorten in Deutschland sowie zur Entwicklung der Bewässerungstechnik zu geben. Die Bewässerung von Kulturen im Freilandgemüsebau oder Sonderkulturbereich gehört in ganz Deutschland seit langem zur gängigen Praxis. Die Rentabilität der Bewässerung weiterer landwirtschaftlicher Feldkulturen war bisher auf einige wenige, trockene Standorte begrenzt. Im Zuge des Klimawandels werden seit einigen Jahren eine steigende Jahresdurchschnittstemperatur und veränderte Niederschlagsmuster (v. a. geringere Niederschläge zu Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr) in Deutschland beobachtet. Für die Zukunft sind laut der Ergebnisse von Klimamodellen eine weitere Zunahme der Temperaturen und weitere Veränderungen der Niederschlagsverteilung, z. B. eine Abnahme der Sommerniederschläge und eine Zunahme der Winterniederschläge, zu erwarten. Der Tagungsband gibt einen Überblick über neueste Erkenntnisse aus der Forschung und diskutiert mögliche alternative Quellen für die Deckung des Beregnungswasserbedarfs landwirtschaftlicher Kulturen. Dabei werden auch Aspekte des Landschaftswasserhaushalts und hydrologische Zusammenhänge in der Agrarlandschaft angesprochen und Lösungsansätze präsentiert. Einblicke in mögliche Nutzungskonflikte der Wassernutzung und praktische Erfahrungen mit der Erarbeitung von Lösungsansätzen werden begleitet von der Darstellung der rechtlichen Rahmenbedingungen der Wassernutzung. Ergänzt werden die Beiträge durch Berichte langjähriger Beregnungs-Feldversuche der Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Einerseits ergaben die Versuche, dass die Bewässerung die Nährstoffeffizienz der Pflanzen und die Qualität der Ernteprodukte erhöhen kann. Andererseits werden der derzeitige Stand der Technik der Bewässerung erläutert und Grenzen sowie Möglichkeiten für eine Steigerung der Effizienz in der Zukunft dargelegt. Zur Steigerung der Effizienz der Bewässerung kommt der Bewässerungssteuerung eine hohe Bedeutung zu, deren aktueller Stand dargestellt und die Trends für die Zukunft aufgezeigt werden. Die Rentabilität der Investitionen in Bewässerungstechnik wird in zwei Beiträgen dargestellt. Hier werden sowohl die verschiedenen Techniken als auch deren Rentabilität bei verschiedenen Kulturen betriebswirtschaftlich beurteilt. Als Abrundung wird die Entwicklung des regionalen Bewässerungsbedarfs am Beispiel Nordrhein-Westfalens aufgezeigt. Der Tagungsband schließt mit einem Kapitel zur Übersicht über bisherige Projekte im Bereich des Wassermanagements und zu Fragen der Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen im Hinblick auf zukünftige Klimaveränderungen in Deutschland.

JEL: Q 15, Q16, Q 25, Q 32, Q 54

Schlüsselwörter: Bewässerung, Landwirtschaft, Klimawandel, Feldberegnung, Anpassung an den Klimawandel

Summary

On September 11 and 12, 2017, a symposium on "Irrigation in agriculture", jointly organized by the Thünen Institute, the Julius-Kühn Institute and the University of Applied Sciences Ostfalia took place at the Ostfalia University of Applied Sciences, Campus Suderburg. For this purpose, experts from the field of irrigation were invited to give current assessments on the development of irrigation needs and the irrigation-worthiness of different crops at different locations in Germany as well as on the development of irrigation technology. The irrigation of crops in outdoor vegetables or special crops has long been a common practice. The profitability of irrigating agricultural crops in Germany has so far been limited to a few, dry locations. As a result of climate change, an increasing average annual temperature and changed precipitation patterns (in particular lower rainfall at the beginning of the vegetation period in spring) have been observed in Germany for some years now. For the future, according to the results of climate models, a further increase in temperatures and further changes in the precipitation distribution such as a decrease in the summer precipitation and an increase in winter precipitation are to be expected. The conference proceedings provide an overview of the latest research findings from the field of drought stress and discuss possible alternative sources for meeting the additional water requirements of agricultural crops. Aspects of the landscape water balance and hydrological correlations in the agricultural landscape are addressed and solutions presented. Insights into possible conflicts of water use and practical experience with the development of solutions are accompanied by the presentation of the legal framework for water use. The contributions are supplemented by reports of long-term irrigation field trials conducted by the LWK Lower Saxony. On the one hand, the experiments have shown that irrigation can increase the nutrient efficiency of crops and the quality of crops. On the other hand, the present state of the art of irrigation will be explained and limits and possibilities for increasing efficiency in the future will be presented. In order to increase the efficiency of irrigation, irrigation control is of great importance; its current status is presented and the trends for the future are shown. The profitability of investments in irrigation technology is presented in two contributions. Here, both the different techniques and their profitability in different crops are assessed economically. Possible developments of regional irrigation needs are exemplarily shown for the federal state of North Rhine-Westphalia. The conference proceedings conclude with a chapter on the overview of previous projects in the field of water management and on irrigation of agricultural land in view of future climate change in Germany.

JEL: Q 15, Q16, Q 25, Q 32, Q 54

Keywords: Field irrigation, agriculture, climate change, climate change adaptation

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Summary	iii
Inhaltsverzeichnis	I
Vorwort	1
1 Wird das Wasser knapp? Wasserbedarf und -verfügbarkeit heute und in Zukunft Dr. Mathias Herbst und Dr. Cathleen Frühauf	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Wasserverfügbarkeit bis heute	1
1.3 Wasserbedarf bis heute	2
1.4 Zukunftsprojektionen von Wasserbedarf und -verfügbarkeit	4
1.5 Fazit	8
2 Notwendigkeit der Bewässerung aus Sicht des Pflanzenbaus Dr. Siegfried Schittenhelm und Dr. Lorenz Kottmann	11
2.1 Zusammenfassung	11
2.2 Einleitung	11
2.3 Ziel und Bedeutung der Bewässerung	12
2.4 Die Situation der Bewässerung in Deutschland	13
2.5 Ergebnisse ausgewählter Versuche zum Thema Bewässerung am Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde	13
2.6 Die aktuelle globale Situation der Bewässerung	19
2.7 Fazit	21
3 Hydrologische und biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft – vernachlässigte Aspekte und Lösungsansätze Prof. em. Heiko Diestel	23
3.1 Zusammenfassung	23
3.2 Einleitung	23
3.3 Erhöhung der Verdunstung durch Zulassung bzw. Förderung einer größeren hydrologischen und biologischen Vielfalt	27

3.4	Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Verbesserungen der Wasser- und Energiebilanzen in der Landschaft	30
3.5	Fazit	32
4	Landwirtschaftliche Nutzung von behandeltem Abwasser aus Umwelt- und Gesundheitssicht Manuela Helmecke	35
4.1	Einleitung	35
4.2	Was plant die EU zur Förderung von Wasserwiederverwendung?	35
4.3	Risiken durch Wasserwiederverwendung	39
4.4	Fazit und Empfehlungen	43
5	Erfahrungen aus der Abwassernutzung auf landwirtschaftlichen Flächen Bernhard Teiser	47
5.1	Einleitung	47
5.2	Voraussetzungen der landwirtschaftlichen Abwasserverwertung	50
5.3	Vorteile der landwirtschaftlichen Abwasserverwertung	51
5.4	Herausforderungen	53
5.5	Das Abwasserkonzept Braunschweig	55
5.6	Nachwachsende Rohstoffe	56
5.7	Fazit und Ausblick	58
6	Rechtliche Aspekte und Konflikte landwirtschaftlicher Wassernutzung Dr. Sandra Kruse	59
6.1	Hintergrund	59
6.2	Rechtliche Aspekte	59
6.3	Grundsätze des rechtlichen Rahmens	60
6.4	Hessisches Ried – Beregnungsregion Südhessen	61
6.5	Die Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main	62
6.6	Zusammenfassung	63
7	Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung – Stand und Trends Ekkehard Fricke	65
7.1	Allgemein	65
7.2	Bewässerungstechniken	65

7.3	Bewässerungssteuerung	69
7.4	Fazit/Ausblick	72
8	Wem gehört das Wasser – ein Bericht der Wasserverbände Godehard Hennies	77
9	Sensorgestützte Beregnungssteuerung – ein Blick in die angewandte Forschung Jano Anter, Martin Kraft und Dr. Tina Langkamp-Wedde	81
9.1	Einleitung	81
9.2	Motivation	82
9.3	Methode	82
9.4	Projektdurchführung und -vorhaben	83
9.5	Fazit und Ausblick	87
10	Verbesserung der Nährstoffeffizienz durch Bewässerung Angela Riedel	89
10.1	Einleitung	89
10.2	Grundlagen	89
10.3	Versuchsergebnisse	91
10.4	Fazit	101
11	Betriebswirtschaftliche Eckdaten zur landwirtschaftlichen Bewässerung Dr.-Ing. Norbert Fröba und Till Belau	103
11.1	Datenherkunft und -verfügbarkeit	103
11.2	Für die Bewässerung nötige Investitionen	103
11.3	Arbeitserledigung	106
11.4	Fazit	111
12	Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung Dr. Thomas de Witte	113
12.1	Einleitung	113
12.2	Standortbeschreibung und Annahmen für die Kalkulationen	114
12.3	Kosten unterschiedlicher Bewässerungstechnologien	115
12.4	Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung	120
12.5	Fazit	122

13	Entwicklung des regionalen Bewässerungsbedarfs – Engpässe in der Zukunft?	
	Jano Anter, Peter Kreins, Dr. Claudia Heidecke und Dr. Horst Gömann	125
13.1	Einleitung	125
13.2	Bewässerungsbedürftigkeit und Bewässerungswürdigkeit in Deutschland	126
13.3	Beregnungswürdigkeit am Beispiel von Nordrhein-Westfalen	129
13.4	Wasserengpässe in der Zukunft? – Beispiel NRW	133
13.5	Schlussfolgerung	135
14	Herausforderungen für die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen in Deutschland	
	Dr. Sonja Schimmelpfennig, Dr. Claudia Heidecke, Jano Anter	137
14.1	Hintergrund	137
14.2	Bewässerung als Anpassungsmaßnahme – bisherige Projekte	138
14.3	Bewertung verschiedener Methoden zur Anpassung an zunehmende Trockenheit	138
14.4	Regionale Auswirkungen auf das Wassermanagement	140
14.5	Bewässerung und Wasserdargebot	141
14.6	Möglichkeiten der Grundwasseranreicherung und Entlastung von Grundwasserkörpern	141
14.7	Ausblick	142

Vorwort

Die Bewässerung von Kulturen im Freilandgemüsebau oder Sonderkulturbereich gehört in ganz Deutschland seit langem zur gängigen Praxis. Die Rentabilität der Bewässerung weiterer landwirtschaftlicher Feldkulturen war bisher auf einige wenige, trockene Standorte begrenzt. Der als Tagungsort gewählten Region Nordost-Niedersachsen kommt dabei, bedingt durch die spezifischen Standortbedingungen, eine Vorreiterfunktion zu. Die Region Uelzen stellt das größte zusammenhängende Bewässerungsgebiet Deutschlands dar, in dem bereits heute im Sommer Engpässe im Wasserdargebot für die Feldbewässerung bestehen. Durch eine langjährige Zusammenarbeit von Verbänden, Wissenschaft und Praxis werden hier innovative Lösungsstrategien entwickelt, die beispielhaft auch in anderen Regionen genutzt werden können.

Um den Austausch unterschiedlicher Akteure aus verschiedenen Regionen Deutschlands zu ermöglichen, veranstaltete das Thünen-Institut, das Julius-Kühn-Institut und die Ostfalia Hochschule auf Anregung des Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft am 11./12. September 2017 eine gemeinsame Fachtagung mit dem Titel „Bewässerung in der Landwirtschaft“. Zur Tagung mit ca. 100 Teilnehmern kamen nicht nur Interessierte und Interessenvertreter aus der Region, sondern auch verschiedene Akteure aus anderen Regionen, in denen teilweise ähnliche oder sogar verschärfte Wassernutzungskonflikte auftreten. Die thematische Vielfalt der Teilnehmer ermöglichte einen regen Austausch und Diskussionen mit Beiträgen aus unterschiedlichen Blickwinkeln.

In einem ersten Schwerpunkt der Tagung ging Dr. Herbst der Frage nach, ob sich der Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft in Deutschland im Hinblick auf bereits beobachtete und erwartete Klimaänderungen wie z. B. dem Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur verändern wird (Kapitel 1). Anhand neuester Versuchsergebnisse stellte Herr Dr. Schittenhelm dar, wie sich die prognostizierten Klimaänderungen auf die Kulturpflanzen und den Ertrag auswirken könnten und wie Unterschiede in Fruchtfolgen und Sortenwahl gezielt für eine Verbesserung der Wassernutzungseffizienz beitragen können (Kapitel 2). Herr Prof. Diestel machte den Einfluss der Landnutzung und der landwirtschaftlichen Praxis auf das Verdunstungs- und Niederschlagsgeschehen deutlich und zeigte auf, wie dieses beeinflusst werden kann (Kapitel 3).

Eine mögliche Strategie, um den Nutzungsdruck auf Grundwasserkörper durch Wasserentnahmen für die Bewässerung abzuschwächen, ist der Einsatz von Klarwasser aus der kommunalen Abwasserwirtschaft. Die derzeit geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen und eine Einschätzung der angestrebten Neuerungen auf EU-Ebene bezüglich der Nutzung kommunaler Abwässer in der Landwirtschaft wurden von Frau Helmecke dargestellt (Kapitel 4). Ein praktisches Beispiel der Nutzung kommunaler Abwässer zur Bewässerung stellte Herr Teiser vom Abwasserverband Braunschweig vor. Die historisch gewachsene und immer wieder an gesellschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen angepasste Abwassernutzung stellt eine Regionallösung mit Beispielcharakter dar (Kapitel 5).

Die Einbettung der landwirtschaftlichen Wassernutzung in die rechtlichen Rahmenbedingungen wurde durch Frau Dr. Kruse und Herrn Hennies vorgenommen. Dr. Kruse stellte die Situation der unterschiedlichen Wassernutzungsbedarfe im hessischen Ried innerhalb des rechtlichen Rahmens dar und präsentierte die dort entwickelten Lösungsansätze (Kapitel 6). Herr Hennies skizzierte die verschiedenen Aufgaben der Wasserwirtschaft in Niedersachsen und bettete die Wasserwirtschaft in EU-Verordnungen sowie nationale Bestimmungen ein. Er stellte auch einen vom Wasserverbandstag e. V. entwickelten Leitfaden zu den wasserrechtlichen Verfahren, die bei der Nutzung von Gewässern für die landwirtschaftliche Bewässerung zu berücksichtigen sind, vor (Kapitel 8).

Im Rahmen eines knapper werdenden nutzbaren Dargebots von Bewässerungswasser werden Effizienzfragen immer wichtiger. Der Ermittlung des optimalen Bewässerungszeitpunktes und der idealen Wassermenge durch Maßnahmen zur Bewässerungssteuerung kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. In einem Kooperationsprojekt wird dazu derzeit die sensorgestützte Bewässerung von Kartoffeln entwickelt, wie von Herrn Anter vorgestellt wurde (Kapitel 9).

Als letzter Schwerpunkt der Tagung wurden die betriebswirtschaftlichen Investitionskosten für verschiedene Bewässerungsformen und Kulturen sowie unterschiedliche Fruchtfolgen berechnet. Hier stellte Herr Dr.-Ing. Fröba die in Deutschland am meisten genutzten Bewässerungssysteme Rohrberegnung, Kreis- und Linearberegnung und Tropfbewässerung für die Zusatzbewässerung vor und gab einen umfassenden Überblick über die jeweiligen Gesamt-Investitionskosten, die auf den Betrieb zukommen (Kapitel 11). Dr. de Witte errechnete eine gesamtbetriebliche, den Bewässerungsbedarf verschiedener Kulturen und Fruchtfolgen berücksichtigende Bilanz zur Wirtschaftlichkeit verschiedener Bewässerungsarten (Kapitel 12). Mögliche zukünftige Engpässe für die landwirtschaftliche Bewässerung durch eine potenzielle Abnahme der Grundwasserneubildung wurden von Dr. Heidecke exemplarisch anhand von Projektergebnissen aus Nordrhein-Westfalen erläutert (Kapitel 13).

Im Verlauf der Tagung wurde deutlich, dass das Thema Bewässerung bereits jetzt viele Akteure beschäftigt und insbesondere in Kombination mit den Themen Wasserschutz und Wasserressourcenmanagement eine immer wichtigere Rolle spielen wird. Um im Hinblick auf zukünftige Veränderungen der Wasserverfügbarkeit und mögliche Nutzungskonflikte eine proaktive Handlungsweise zu erarbeiten, bedarf es eines frühzeitigen fachlichen Austauschs zwischen Forschungs- und Beratungseinrichtungen, der Verwaltung und der landwirtschaftlichen Praxis.

Die auf der Tagung vorgestellten Aspekte stellen die Grundlage der Erarbeitung von Strategien und Maßnahmen zur Lösung potenzieller Wassernutzungskonflikte dar, die eine Zusammenarbeit von Wissenschaft, Verbänden, Behörden und Praxis erfordern. Der vorliegende Tagungsband soll mit der Zusammenfassung der Beiträge und Ergebnisse der Fachtagung als Anregung dazu dienen, die Chancen und Hindernisse des zukünftigen Wassermanagements in den verschiedenen Regionen Deutschlands zu identifizieren und dazu motivieren, an gemeinsamen Lösungen zu arbeiten.

Wir bedanken uns für die gute Zusammenarbeit bei dem Julius Kühn-Institut und der Ostfalia Hochschule, die u. a. durch die Bereitstellung der Tagungsräume einen anregenden, fachlichen Austausch während der Tagung ermöglicht hat. Ein ganz besonderer Dank gilt den Mitarbeitern der Landwirtschaftskammer Niedersachsen, die ihre langjährige Erfahrung mit der Feldbewässerung sowohl anhand theoretischer Beiträge in Form von Vorträgen und Beiträgen im Tagungsband (Kapitel 7 und 10) als auch praktisch mit einer Feldbegehung am zweiten Tagungstag mit den Teilnehmern teilten. Allen Fachreferenten sei herzlich für ihre Vorträge und Ausarbeitungen der Beiträge für diesen Tagungsband gedankt.

Dr. Sonja Schimmelpfennig, Dr. Claudia Heidecke, Jano Anter, Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher, Dr. Florian Bittner

Braunschweig, Suderburg und Quedlinburg, im Januar 2018

1 Wird das Wasser knapp? Wasserbedarf und -verfügbarkeit heute und in Zukunft

Dr. Mathias Herbst und Dr. Cathleen Frühauf

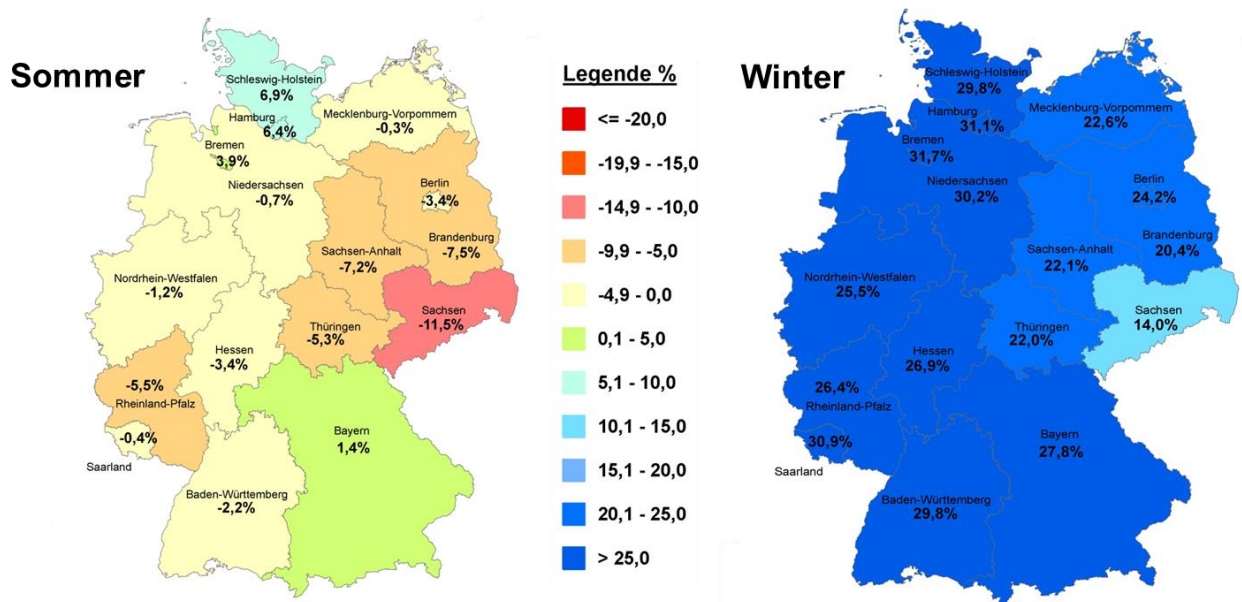
Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung

1.1 Einleitung

Die derzeitige Zunahme des atmosphärischen Treibhauseffekts und die daraus resultierende Erderwärmung, zu der die anthropogenen Treibhausgasemissionen wesentlich beitragen, haben große Auswirkungen auf den globalen Wasserkreislauf. Der messbare Anstieg der atmosphärischen Strahlungsbilanz führt zu einem Energieüberschuss an der Erdoberfläche, der die Verdunstung ankurbelt und mehr Wasserdampf in die Atmosphäre transportiert. Eine Intensivierung des globalen Wasserkreislaufs mit stärkeren Niederschlägen ist deshalb eine der bedeutendsten Folgen der Erderwärmung. Während die Messung des Niederschlags seit langem zu den Routineaufgaben der nationalen Wetterdienste gehört, ist die aktuelle Verdunstung zumindest in der Fläche nicht direkt messbar. Sie wird daher im Allgemeinen mit mehr oder weniger komplizierten Verfahren berechnet, wobei die Herausforderung darin besteht, die vielfältigen Steuermechanismen der Verdunstung – von den meteorologischen Größen über die physiologische Regulation der pflanzlichen Wasserabgabe bis hin zu Effekten der Bewirtschaftungsmaßnahmen – zu berücksichtigen. Auf die Beeinflussung der Verdunstung durch Änderungen der Landnutzung wird im Rahmen dieses Tagungsbandes gesondert in dem Beitrag von H. Diestel (Kapitel 3) eingegangen. Im Deutschen Wetterdienst (DWD) ist für die Bilanzierung des Wasserhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen die Abteilung Agrarmeteorologie mit dem Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF) als Forschungsreferat mit eigenen Versuchsflächen in Braunschweig zuständig.

1.2 Wasserverfügbarkeit bis heute

Als Bestandteil der routinemäßigen Klimaüberwachung in Deutschland verfügt der DWD über kontinuierliche Messreihen des Niederschlags seit 1881. Derzeit befinden sich rund 500 Niederschlags-Messstationen in der agrarmeteorologischen Tagesroutine. Vergleicht man die Messreihen der vergangenen ca. 130 Jahre aufgeschlüsselt nach Jahreszeiten, wird deutlich, dass die Niederschläge im Sommer (Juni bis August) bundesweit praktisch unverändert geblieben sind, von geringen regionalen Unterschieden wie z. B. einer leichten Zunahme in Schleswig-Holstein oder einer leichten Abnahme in Sachsen einmal abgesehen (Abbildung 1-1). In den drei meteorologischen Sommermonaten beträgt er durchschnittlich ca. 250 mm. Demgegenüber ist der Niederschlag im Winter (Dezember bis Februar) im gleichen Zeitraum überall angestiegen, und zwar im Mittel um rund ein Drittel von ca. 150 auf ca. 200 mm.

Abbildung 1-1: Prozentualer Niederschlagstrend 1881-2009

Quelle: DWD (2017).

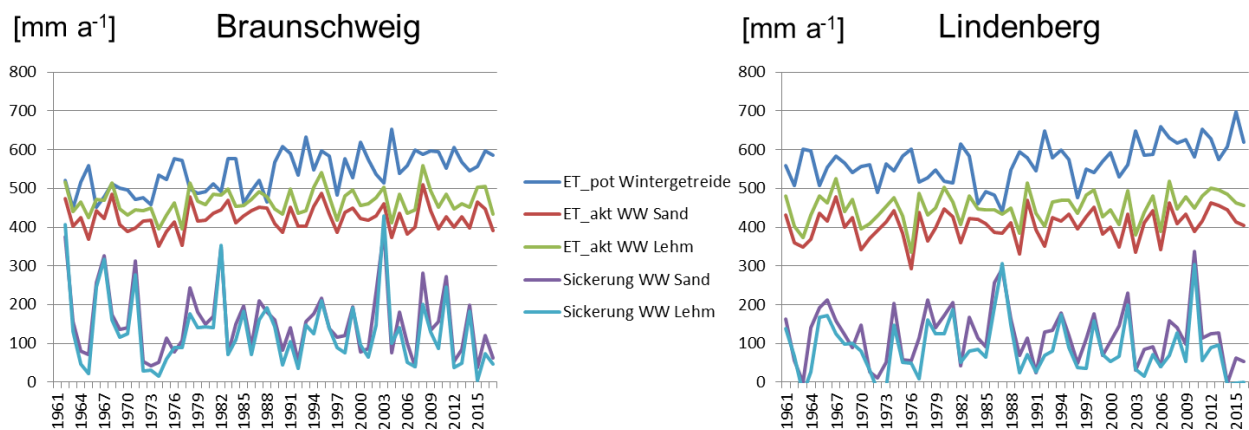
1.3 Wasserbedarf bis heute

Der landwirtschaftliche Wasserbedarf wird im DWD mittels am ZAMF entwickelter agrarmeteorologischer Mikroklima- und Verdunstungsmodelle berechnet. In diese Berechnungen fließen aktuelle Stations-Messdaten, Daten der numerischen Wettervorhersage, phänologische Beobachtungen sowie Daten zur Kulturführung auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen ein. Das Softwarepaket AMBER („Agrarmeteorologische Beratungssoftware“) beschreibt dabei die einzelnen Verdunstungskomponenten (Transpiration, Bodenevaporation und Interzeptionsverdunstung), den Wassergehalt der durchwurzelten Bodenschichten, die Blattbenetzung mit Regen bzw. Tau sowie die Bestandes- und Bodentemperaturen, aus denen wiederum abgeleitete Größen wie z. B. die Verbreitung und Flugaktivität von Schad- und Nutzinsekten, Pflanzenkrankheits-Risiken, Bodenbefahrbarkeit, Bedingungen für Düngung, Pflanzenschutz und Ernte abgeschätzt werden. Eine Validierung der Modellausgabe mittels Feldmessungen (insbesondere der Bodenfeuchte) erfolgt bislang vor allem auf dem ZAMF-Gelände in Braunschweig, ist künftig aber auch für andere Standorte geplant.

Als Beispiel für die Ergebnisse der AMBER-Berechnungen wird hier die Entwicklung der jährlichen Verdunstung und Sickerung für Winterweizen (Abbildung 1-2) und Zuckerrüben (Abbildung 1-3) seit 1961 gezeigt, und zwar jeweils getrennt für Sand- und Lehmboden und für zwei klimatisch unterschiedliche Standorte in Niedersachsen (Braunschweig) und Brandenburg (Lindenberg). Dabei fällt auf, dass insbesondere in den letzten ca. 25 Jahren die Kurven der potenziellen und der aktuellen Verdunstung (ohne Berücksichtigung etwaiger Bewässerungsmaßnahmen) deutlich auseinanderlaufen, d. h. das pflanzenverfügbare Wasser im Boden hält während der Haupt-

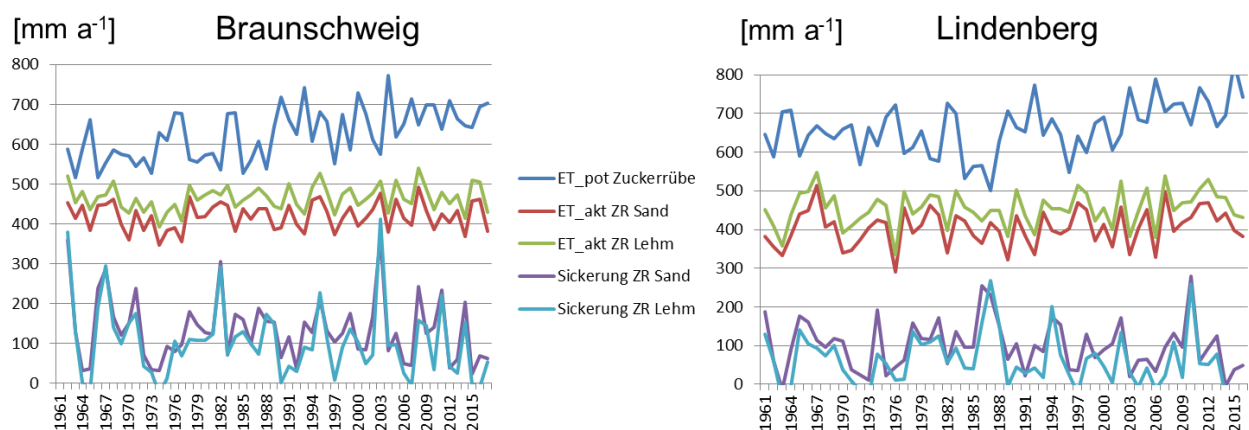
wachstumsperiode mit dem durch die meteorologischen Bedingungen vorgegebenen Wasserbedarf immer weniger Schritt. Demgegenüber zeichnet sich derzeit kein eindeutiger Trend bei der jährlichen Tiefensickerung und damit der Grundwasserneubildung ab, da die zunehmenden Winterniederschläge das Wasserdefizit im Boden, bislang zumindest, im langjährigen Mittel ausgleichen konnten.

Abbildung 1-2: Potenzielle und aktuelle Jahresverdunstung sowie jährliche Sickerung für Winterweizen auf Sand- und Lehm Boden, jeweils an Stationen in Niedersachsen und Brandenburg



Quelle: DWD (2017).

Abbildung 1-3: Wie Abbildung 1-2, jedoch für Zuckerrüben



Quelle: DWD (2017).

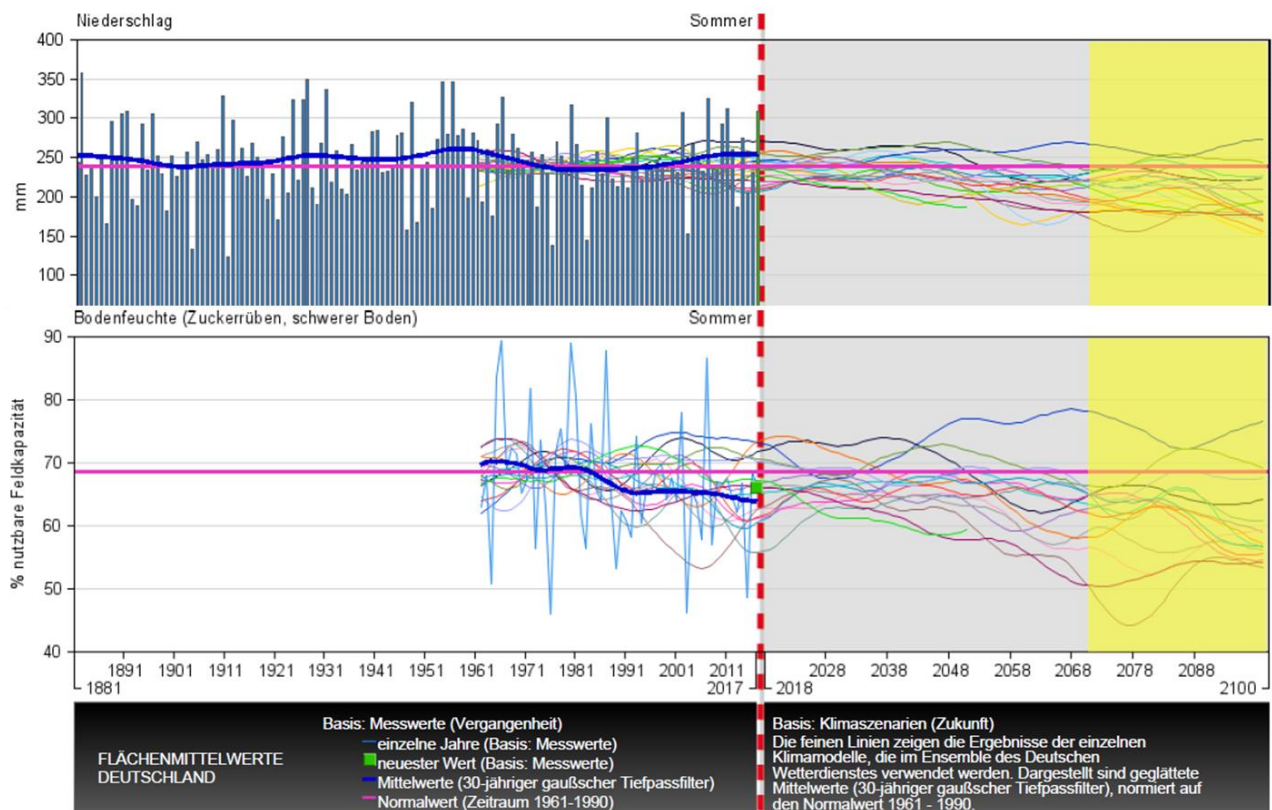
1.4 Zukunftsprojektionen von Wasserbedarf und -verfügbarkeit

Die Klimadatengrundlage für die Modellrechnungen des DWD umfasst einerseits Realdaten von 132 Stationen seit 1961, die flächendeckend interpoliert werden und u. a. Stundenwerte von Lufttemperatur und -feuchte, Niederschlag, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit beinhalten. Damit können Klimabedingungen und Witterungsverläufe vergangener Zeiträume analysiert werden. Für die Zukunftsprojektionen auf der Grundlage des derzeit als besonders wahrscheinlich geltenden A1B Szenarios werden 21 Regionalmodelle auf einem 25x25 km Raster für den Zeitraum 1961 bis 2098 gerechnet. Agrarmeteorologische Kenngrößen werden in beiden Fällen mit der AMBER-Software berechnet. Auf dieser Grundlage werden Karten mit aktuellen Daten, langjährigen Mittelwerten sowie prognostizierten Änderungen erzeugt, die im Internet unter www.deutscher-klimaatlas.de für jedermann abrufbar sind. Dabei können sowohl allgemeine meteorologische Größen als auch spezielle agrarmeteorologische Parameter dargestellt werden, und zwar wahlweise für bestimmte Monate, Jahreszeiten oder Jahre und bezogen entweder auf ganz Deutschland oder auf einzelne Bundesländer.

Im Ergebnis zeigt sich u. a., dass man bis zum Ende dieses Jahrhunderts mit einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von rund 3 °C gegenüber der Referenzperiode 1961-1990 rechnen kann. Während die prognostizierte Änderung der Niederschläge in der Jahressumme eher moderat ausfällt, sagen die Modelle eine weitere deutliche Erhöhung der Winterniederschläge voraus, während für die Sommermonate eine leichte Tendenz hin zu einer Abnahme der Niederschläge erkennbar ist. Für Frühjahr und Herbst wird durch die meisten Modelle jeweils eine leichte Zunahme der Niederschläge im Laufe des Jahrhunderts vorhergesagt.

Dadurch, dass die Klimaprojektionen bereits ab dem Jahr 1961 gerechnet werden können, ist es möglich, die im Rahmen dieser Projektionen bis zum Jahr 2017 vorhergesagten Entwicklungen der agrarmeteorologischen Parameter mit den tatsächlichen Beobachtungen zu vergleichen. Während die mit den DWD-Modellen berechnete Bodenfeuchte für die verschiedenen meteorologischen Eingangs-Datensätze (Messdaten einerseits und Projektionsdaten andererseits) im Sommer (Abbildung 1-4) und im Winter jeweils gut übereinstimmt, zeichnen sich Probleme der Projektionsdaten in den Übergangsjahreszeiten ab.

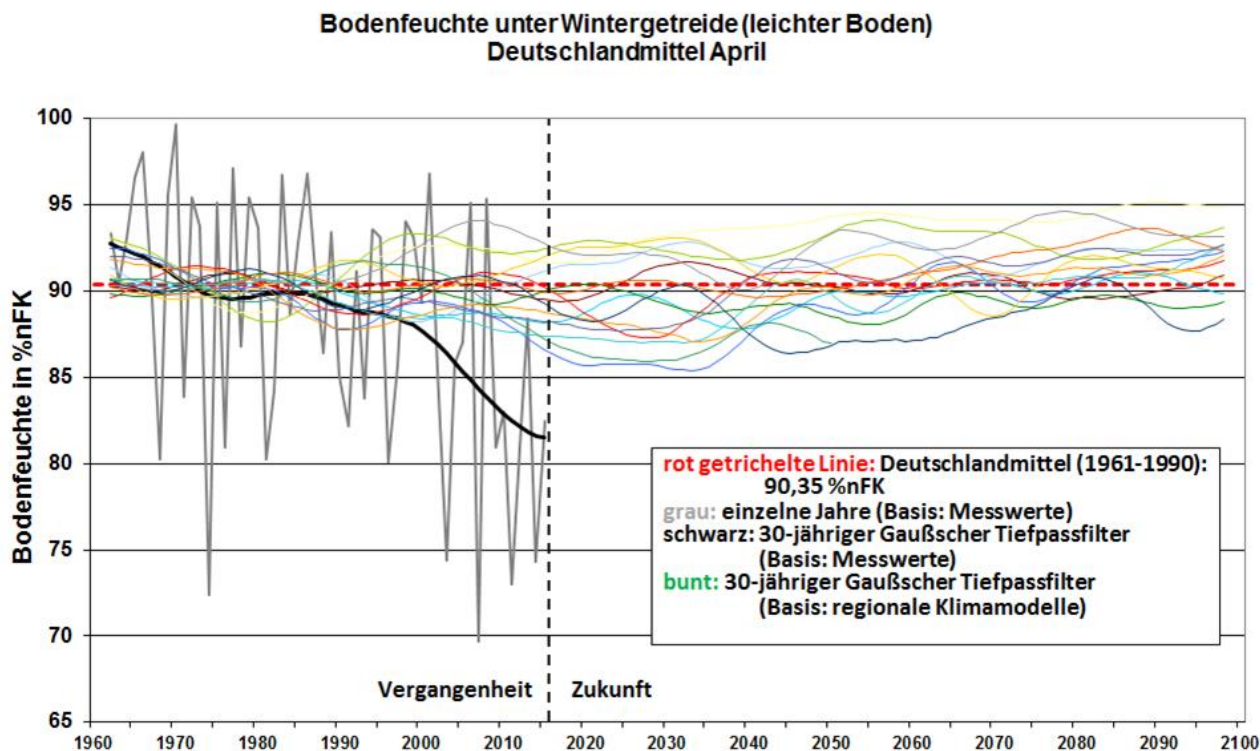
Abbildung 1-4: Berechnete Bodenfeuchte unter Zuckerrüben auf schweren Böden, oben auf Basis langjähriger Stations-Messdaten und unten auf Basis von Klimaprojektionsdaten



Quelle: DWD-Klimaatlas (2017)

Beispielsweise geben die Klimaprojektionen keinerlei Hinweise auf die in den letzten Jahren in zunehmendem Maße aufgetretene Frühjahrstrockenheit, wie in Abbildung 1-5 anhand der Bodenfeuchte im April dargestellt ist. Eine präzise und belastbare Vorhersage solcher seasonspezifischen Effekte ist daher auf Basis der heute verfügbaren Klimaprojektionen noch nicht möglich.

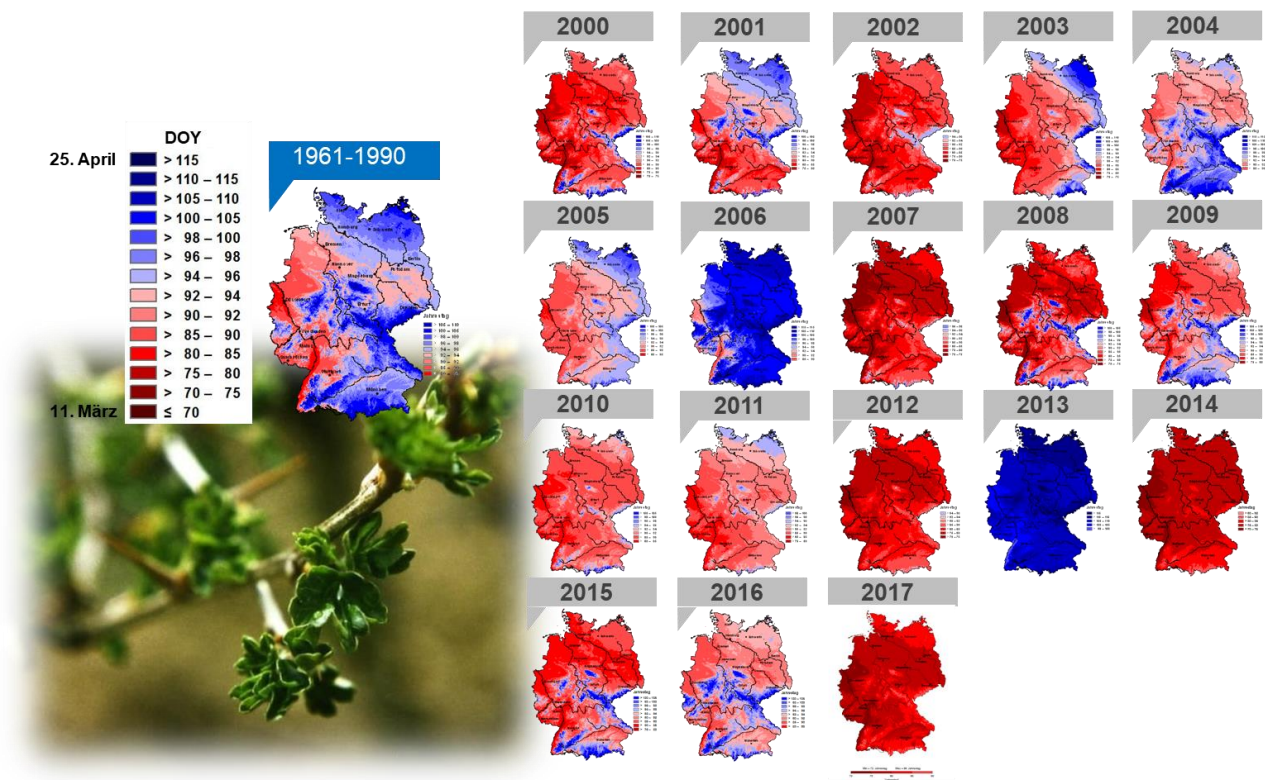
Abbildung 1-5: Berechnete Bodenfeuchte unter Wintergetreide auf leichten Böden im Monat April, sowohl auf der Basis von Messdaten (grau) als auch auf Basis der Klimaprojektionen (bunt)



Quelle: DWD (2017).

Für den Zeitpunkt des Vegetationsbeginns sagen die Klimaprojektionen bis zum Ende dieses Jahrhunderts eine weitere Verfrühung um durchschnittlich rund zwei Wochen voraus, allerdings belegen die phänologischen Beobachtungen der vergangenen Jahre, dass dieser Zeitpunkt von Jahr zu Jahr durchaus um einen ganzen Monat variieren kann, wie z. B. die besonders späten Jahre 2006 und 2013 im Vergleich zu den sehr frühen Jahren 2007 und 2014 zeigen (Abbildung 1-6).

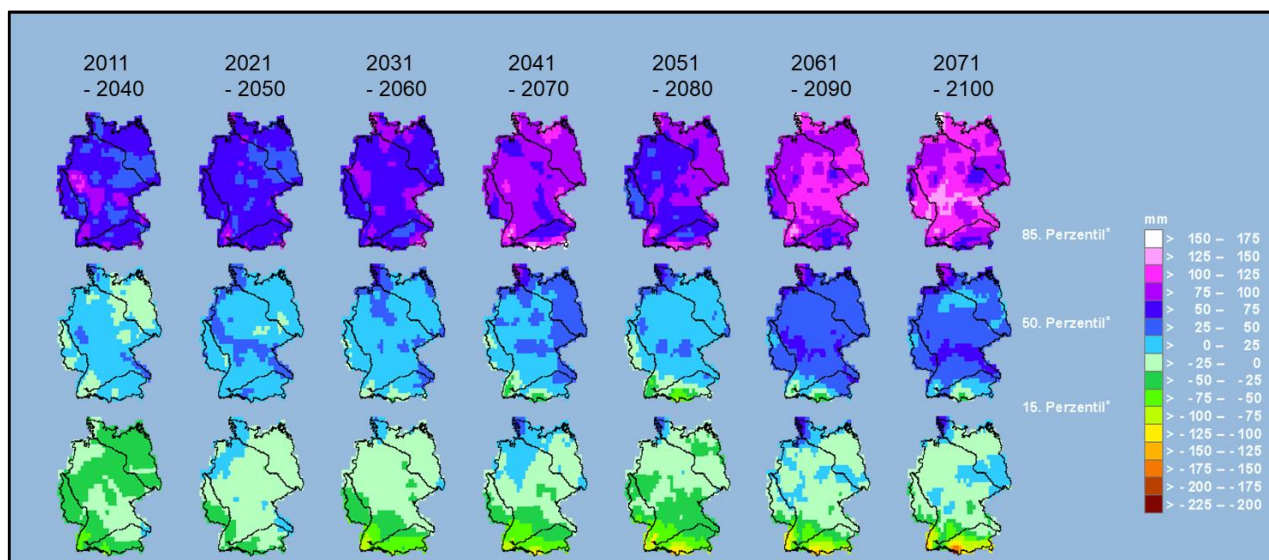
Abbildung 1-6: Beobachtetes Datum des Vegetationsbeginns in den vergangenen 18 Jahren und im Mittel 1961-1990



Quelle: DWD (2017).

Die große Schwankungsbreite macht es besonders schwer, die Risiken für mögliche Schäden durch Spätfröste für die kommenden Jahrzehnte verlässlich zu beziffern. Die nicht nur für die Landwirtschaft, sondern für den gesamten Gebietswasserhaushalt einschließlich der Trinkwasserversorgung so wichtige Größe der zukünftigen jährlichen Sickerungsraten (und damit der Grundwasserneubildung), lässt sich für Deutschland insgesamt zwar nicht einheitlich beantworten, jedoch wird von den Modellen für weite Teile des Bundesgebietes eine recht deutliche Zunahme bis Ende des Jahrhunderts zwischen 25 und 50 % vorhergesagt (Abbildung 1-7).

Abbildung 1-7: Änderungstendenzen der jährlichen Sickerungsrate unter Zuckerrüben im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990. Die mittlere Reihe (50. Perzentil) entspricht der mittleren und damit wahrscheinlichsten Prognose aus den 21 verwendeten Klimamodellen



Quelle: DWD (2017).

Die derzeit kontrovers diskutierte Frage der hydrologischen Auswirkungen eines „Greenings“ durch vermehrten Zwischenfruchtanbau in der Landwirtschaft bzw. durch Anbauverdichtung im Gartenbau wird daher aus agrarmeteorologischer Sicht in Bezug auf die prognostizierte Entwicklung bis zum Ende dieses Jahrhunderts insgesamt als eher weniger kritisch angesehen, wobei aber stets regionale und bodenspezifische Aspekte berücksichtigt werden müssen.

Ökonomisch gesehen ist für die Landwirtschaft besonders der Zusammenhang zwischen einer möglichen Wasserknappheit und dem Ertrag von großer Bedeutung. So schätzt die Welternährungsorganisation (FAO) das trockenheitsbedingte Ertragsdefizit landwirtschaftlicher Kulturen aus einem linearen Zusammenhang zwischen prozentualer Ertragseinbuße und dem Verhältnis von aktueller zu potenzieller Verdunstung (betrachtet über die gesamte Wachstumsperiode) ab. Ob der Ertrag über- oder unterproportional zum Verhältnis dieser beiden Verdunstungsraten abnimmt, hängt dabei von der betrachteten Pflanzenart ab. Für eine genauere Analyse des Zusammenhangs zwischen Wasserversorgung und Ertrag sei im Rahmen dieses Tagungsbandes auf den Beitrag von S. Schittenhelm (Kapitel 2) verwiesen.

1.5 Fazit

In den vergangenen Jahrzehnten sind die Sommerniederschläge in Deutschland im Mittel unverändert geblieben, während die Winter nasser geworden sind. Aufgrund der steigenden Temperaturen ist die potenzielle Verdunstung gestiegen, während sich die aktuelle Verdunstung nicht signifikant verändert hat. Die zunehmende Differenz zwischen aktueller und potenzieller Ver-

dunstung während der Vegetationsperiode deutet auf ein gestiegenes Potenzial für Ertragssicherung bzw. -steigerung durch Bewässerung hin. Angesichts der Tatsache, dass die jährliche Sickerung zwar eine hohe interannuelle Variabilität, jedoch keinen eindeutigen Trend zeigt, ist bislang keine Gefahr für die Grundwasserneubildung erkennbar. Auch für die kommenden Jahrzehnte ist mit steigenden Temperaturen bei gleichbleibenden Sommer- und steigenden Winterniederschlägen zu rechnen. Besonders unsicher ist dabei die künftige Wasserverfügbarkeit im Frühjahr, da keines der verfügbaren Klimaszenarien in der Lage ist, den zuletzt beobachteten Trend zu häufigerer Frühjahrstrockenheit korrekt wiederzugeben.

Im Rahmen der künftigen Forschungsarbeiten am ZAMF sollen u. a. die neuen Klimaszenarien (Representative Concentration Pathways, RCPs) in die agrarmeteorologischen Prognosen einbezogen sowie die möglichen Effekte sich ändernder Pflanzeigenschaften durch Züchtung betrachtet werden. Darüber soll die Rolle von Zwischenfrüchten, Untersaaten und Anbauverdichtung auf den Wasserhaushalt genauer als bisher untersucht werden. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassernutzungseffizienz sollen mittels Kopplung der bislang angewandten agrarmeteorologischen Modelle mit solchen des Kohlenstoffhaushalts und des Pflanzenbaus beurteilt werden. Zur effizienteren Umsetzung dieser Pläne ist eine noch engere, ressortübergreifende Kooperation zwischen DWD, Julius-Kühn-Institut und Thünen-Institut sowie mit dem Fachverband Feldberegnung der LWK Niedersachsen verabredet worden, die schließlich in ein sogenanntes „Kompetenzzentrum Agrarwetter“ münden soll.

2 Notwendigkeit der Bewässerung aus Sicht des Pflanzenbaus

Dr. Siegfried Schittenhelm und Dr. Lorenz Kottmann
Julius Kühn-Institut – Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde

2.1 Zusammenfassung

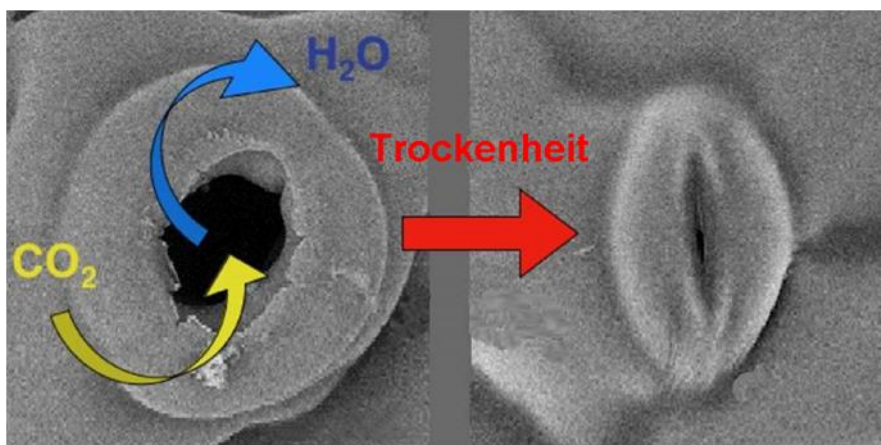
Auf zu Trockenheit neigenden Standorten sind hohe und stabile Erträge nur durch Bewässerung möglich. Die Zusatzbewässerung als Instrument der Ertragssicherung könnte zukünftig noch an Bedeutung gewinnen, weil Klimaprognosen eine allgemeine Erwärmung sowie eine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter voraussagen. Derzeit hat die Bewässerungslandwirtschaft in Deutschland mit einem Anteil von 2,7 % an der landwirtschaftlich genutzten Fläche eine nur geringe Bedeutung (Statistisches Bundesamt, 2016). Untersuchungen zur Wirkung extremer Trockenheit bei Wintergetreide in Rain-out Shelters am Julius Kühn-Institut in Braunschweig ergaben Einbußen im Kornertrag von 60-65 %. Noch stärker reduzierte Trockenstress den Kornertrag bei Winterroggen, wenn er vor statt nach der Blüte auftrat. Eine gute Wasserversorgung während der vegetativen Entwicklungsphase ist wichtig, damit ausreichend Assimilate in Stängeln, Blättern und Blattscheiden zwischengespeichert und bei Trockenheit während der generativen Phase zur Kornfüllung genutzt werden können. Bei Winterweizen kann der Anteil der aus den Stängeln in die Körner verlagerten Assimilate bis zu einem Drittel des Kornertrags ausmachen. Auch bei Kartoffeln ist eine Bewässerung vor der Blüte in Trockenjahren angebracht, um besonders bei Sorten mit einem genetisch bedingten niedrigen Blattflächenindex eine ausreichende Strahlungsaufnahme des Bestandes sicherzustellen. Die Notwendigkeit der Bewässerung ist aber nicht nur eine Frage von Fruchtart und Jahr, sondern wird ganz wesentlich durch die Fruchtfolge bestimmt. So war der bewässerungsbedingte Mehrertrag der sommerannuellen Bio-gaspflanzen Mais, Futterhirse und Sudangrashybride bei Zweifruchtnutzung nach Grünschnittroggen deutlich höher als bei einem reinen Hauptfruchtanbau. Aufgrund der sich verstärkenden Wasserknappheit in vielen ariden und semi-ariden Regionen der Welt gewinnen wassersparende Bewässerungsmethoden wie die Defizitbewässerung (deficit irrigation) und das teilweise Austrocknen der Wurzelzone (partial root-zone drying) zunehmend an Bedeutung. Dabei ist es nicht mehr das Ziel, durch eine an der Evapotranspiration orientierte Wassergabe den maximalen Ertrag anzustreben. Vielmehr soll durch Bewässerung unterhalb des Evapotranspirationsbedarfs und unter Inkaufnahme einer leichten Ertragseinbuße eine starke Wassereinsparung erzielt werden.

2.2 Einleitung

Gelegentlich kann man den Eindruck gewinnen, als wäre es möglich, die Trockentoleranz unserer Kulturpflanzen mit Hilfe moderner Methoden der Pflanzenzüchtung immer weiter zu verbessern, bis sie schließlich überhaupt kein Wasser mehr brauchen. Das ist aber leider keine sinnvolle Strategie. Zum einen sind Pflanzen mit einer den Kakteen vergleichbaren Trockenresistenz für den Landwirt nicht besonders attraktiv. Sie könnten dann zwar längere Phasen ohne Regen unbe-

schadet überdauern, würden aber während dieser Zeit auch keinen Ertragszuwachs aufweisen, sondern vielmehr von der Substanz leben. Zahlreiche Untersuchungen mit verschiedenen Kulturpflanzen haben gezeigt, dass zwischen Wasserverbrauch und Ertrag eine enge positive Beziehung besteht (Literaturübersicht bei Steduto et al., 2007). Ebenso wie sich der Kornertrag von Getreide multiplikativ aus den Ertragskomponenten Anzahl ährentragender Halme, Körner pro Ähre und Tausendkorngewicht zusammensetzt, lässt er sich auch als Produkt der beiden Wasserhaushaltsgrößen Evapotranspiration (ET) und Wassernutzungseffizienz (water use efficiency, WUE) darstellen. Der enge Zusammenhang zwischen ET und Ertrag resultiert aus der Tatsache, dass sowohl die H_2O -Transpiration als auch die CO_2 -Assimilation unter stomatärer Kontrolle stehen (Abbildung 2-1). Bei guter Wasserversorgung sind die Stomata geöffnet, sodass das für die Fotosynthese notwendige Kohlendioxid aufgenommen werden kann. Damit ist aber zwangsläufig die Abgabe von Wasserdampf verbunden.

Abbildung 2-1: Die Spaltöffnungen kontrollieren den Gasaustausch: Bei guter Wasserversorgung sind sie geöffnet und bei Trockenheit geschlossen



Quelle: <https://wikispaces.psu.edu/display/bio110/Plants+I+-+Evolution+and+Diversity> (verändert).

2.3 Ziel und Bedeutung der Bewässerung

Das Hauptziel der Bewässerung in der Pflanzenproduktion ist das Auffüllen des vom Regen abhängigen Bodenwasserspeichers. Zusätzliche Bewässerung hilft dem Landwirt, die nachteilige Wirkung von Trockenstress auf die Ernteerträge zu vermeiden. Trockenstress wirkt sich besonders negativ in Vegetationsperioden aus, in denen wichtige Ertragskomponenten gebildet werden (Ehlers und Goss, 2003). Die globale Bedeutung der Bewässerung in der Landwirtschaft zeigt sich an folgendem Beispiel: Weltweit stammen über 40 % der produzierten Nahrungsmittel von bewässerten Flächen, die aber gleichzeitig lediglich 17 % der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche ausmachen (Feres und Connor, 2004). Mit anderen Worten: Die Erträge in der Bewässerungslandwirtschaft sind etwa doppelt so hoch wie in der rein regenwassergespeisten Landwirtschaft.

2.4 Die Situation der Bewässerung in Deutschland

Während des Sommerhalbjahres (April bis September) ist die potentielle Evapotranspiration in weiten Teilen Deutschlands größer als der natürliche Niederschlag. Eine solche negative klimatische Wasserbilanz weisen insbesondere Standorte mit durchlässigen bzw. flachgründigen Böden und einer hohen Verdunstung auf. Wenn die Prognosen der Klimaforscher stimmen, dann wird sich diese Situation künftig noch dadurch verschärfen, dass sich neben dem Temperaturanstieg die Niederschläge vom Sommer in den Winter verschieben und Niederschlag häufiger als Starkregen auftritt, welcher zu einem großen Teil oberflächlich abfließt. Die Möglichkeit der Ertragsstabilisierung durch Zusatzbewässerung wird u. a. wegen fehlender Technik und rechtlichen Beschränkungen nicht überall genutzt. In Deutschland werden lediglich etwa 2,7 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche (560.000 ha) künstlich beregnet, wobei etwa die Hälfte der Bewässerungsfläche auf Niedersachsen entfällt.

2.5 Ergebnisse ausgewählter Versuche zum Thema Bewässerung am Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde

Wirkung extremer Trockenheit auf den Ertrag von Wintergetreide

Um die Wirkung des Produktionsfaktors Wassers auf die Ertragsbildung zu untersuchen, kann man Pflanzen (a) ergänzend zum natürlichen Niederschlag noch zusätzlich Wasser darbieten, (b) ihnen durch den Einsatz von Rain-out Shelters Wasser vorenthalten oder (c) beides gleichzeitig tun. Die letztgenannte Extremsituation wurde in den Jahren 2010 und 2011 in einem Versuch mit je vier Sorten der Wintergetreidearten Gerste, Roggen, Triticale und Weizen in Braunschweig untersucht (Schittenhelm et al., 2014). Die Rain-out Shelter wurden Anfang April aktiviert, als sich die Getreide in der Bestockungsphase befanden. Ab diesem Zeitpunkt waren die Pflanzen allein vom Bodenwasserspeicher abhängig. In der benachbarten bewässerten Kontrolle wurde hingegen durch zusätzliche Wassergaben über Tropfschläuche sichergestellt, dass die Bodenfeuchte nicht unter 60 % nFK abfällt. Der bis zur Ernte fortgesetzte Regenausschluss hatte im Mittel der Jahre einen Ertragsrückgang von $5,9 \text{ t ha}^{-1}$ (63 %) für den Kornertrag, von $3,5 \text{ t ha}^{-1}$ (39 %) für den Strohertrag und von $9,2 \text{ t ha}^{-1}$ (51 %) für den oberirdischen Biomasseertrag zur Folge (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Mittelwerte für Korn-, Stroh- und oberirdischen Biomasseertrag unter feuchten und trockenen Bedingungen in den Jahren 2010 und 2011 am Standort Braunschweig

Fruchtart	Kornertrag			Strohertrag			Biomasse		
	feucht (t ha ⁻¹)	trocken (t ha ⁻¹)	Δ% ¹	feucht (t ha ⁻¹)	trocken (t ha ⁻¹)	Δ%	feucht (t ha ⁻¹)	trocken (t ha ⁻¹)	Δ%
Gerste	9,7 ^{b2}	3,7 ^a	-62***	7,1 ^c	4,7 ^b	-34***	15,8 ^b	8,4 ^b	-47***
Roggen	10,0 ^a	4,0 ^a	-60***	10,2 ^a	6,8 ^a	-33***	20,3 ^a	10,8 ^a	-47***
Triticale	9,3 ^{ab}	3,3 ^a	-65***	9,8 ^a	5,5 ^b	-44***	19,2 ^a	8,9 ^b	-54***
Weizen	8,7 ^b	3,2 ^a	-63***	8,6 ^b	4,7 ^{ab}	-45***	17,3 ^b	7,9 ^b	-54***

¹ Änderungen relativ zur bewässerten Kontrolle.

² Mittelwerte innerhalb eines Merkmals und Wasserregimes gefolgt von unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$).

*** Unterschiede sind signifikant für $P < 0,001$.

Quelle: Schittenhelm et al. (2014).

Der vergleichsweise geringere trockenheitsbedingte Verlust im Strohertrag erklärt sich damit, dass die vegetative Entwicklungsphase der generativen vorausgeht und damit vergleichsweise stärker von der Winterbodenfeuchte profitieren kann. Da die Fotosynthese während der gesamten Kornfüllungsphase in den Rain-out Shelters sehr stark beeinträchtigt war, muss ein großer Teil des noch überraschend hohen Kornertrags aus der Remobilisierung von Assimilaten stammen, welche bereits vor der Blüte gebildet wurden und vorrübergehend in vegetativen Pflanzenorganen zwischengespeichert waren.

Früher versus später Trockenstress bei Winterroggen

In einem weiteren Experiment mit Winterroggen war die negative Wirkung von Trockenstress auf den Kornertrag vor der Blüte deutlich stärker als nach der Blüte. Die relativ geringe Reduktion des Kornertrags unter spätem Trockenstress lieferte auch in diesem Experiment einen Hinweis darauf, dass die Kornfüllung in erheblichem Umfang mit Assimilaten erfolgte, die während der vegetativen Entwicklungsphase gebildet worden sind (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Mittelwerte für Korn-, Stroh und Biomasseertrag sowie die Komponenten des Kornertrags für verschiedene Wasserregime von Winterroggen in Braunschweig 2013

Wasser-regime	Kornertrag		Strohertrag		Biomasse		Ähren m ⁻²		Körner Ähre ⁻¹		TKG	
	(t ha ⁻¹)	Δ% ¹	(t ha ⁻¹)	Δ%	(t ha ⁻¹)	Δ%	(#)	Δ%	(#)	Δ%	(g)	Δ%
TS _f	8,0 ^d	-34	5,8 ^c	-32	13,8 ^d	-33	569 ^b	-27	38,3 ^b	-16	36,9 ^a	18
TS _s	9,8 ^c	-20	9,9 ^a	16	19,7 ^b	-5	790 ^a	1	45,1 ^a	-1	27,7 ^c	-12
NN	10,3 ^b	-16	8,3 ^b	-2	18,6 ^c	-10	772 ^a	-1	44,4 ^a	-2	30,2 ^b	-4
K	12,2 ^a		8,5 ^b		20,7 ^a		783 ^a		45,4 ^a		31,3 ^b	

¹ Änderungen relativ zur bewässerten Kontrolle.

² Mittelwerte innerhalb eines Merkmals gefolgt von unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (P < 0,05).

TS_f = früher Trockenstress

TS_s = später Trockenstress

NN = natürlicher Niederschlag

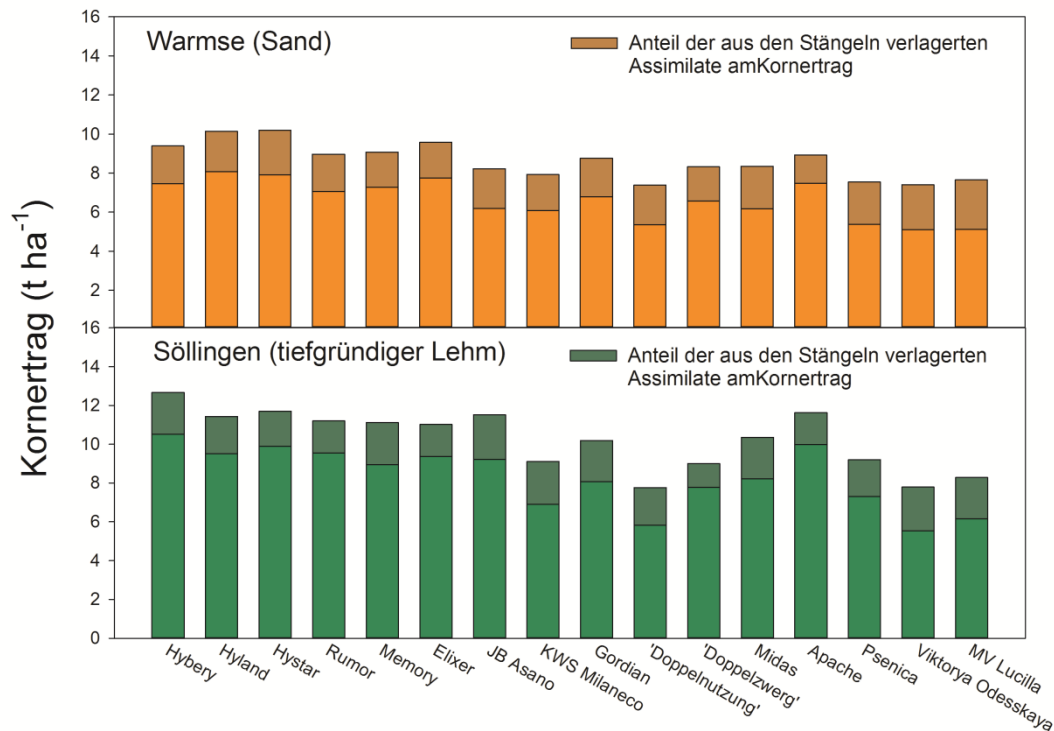
K = bewässerte Kontrolle

Quelle: Kottmann et al. (2016).

Bedeutung der Remobilisierung von Assimilaten für den Kornertrag von Winterweizen

Beim Getreide erfolgt die Kornfüllung sowohl mit Assimilaten aus der aktuellen Fotosynthese als auch durch Verlagerung von in den vegetativen Pflanzenteilen vorwiegend als wasserlösliche Kohlehydrate (water soluble carbohydrates, WSC) zwischengespeicherten Assimilaten (Ehdaie et al., 2008). Bei diesen Nicht-Struktur-Reservekohlehydraten handelt es sich u. a. um Fructose, Glucose, Saccharose und Fructane. Die Ergebnisse der beiden oben beschriebenen Experimente haben gezeigt, dass Translokationsprozesse dann von erheblicher Bedeutung für die Ertragsbildung sind, wenn die Fotosynthese während der Kornfüllung aufgrund von Stress (Trockenheit, Hitze etc.) stark eingeschränkt ist. Nach Yang et al. (2001) können bis zu 90 % des Kornertrages von Assimilaten aus vegetativen Pflanzenteilen wie Stängeln, Blättern und Blattscheiden stammen. Im Gegensatz zu anderen physiologischen Prozessen (z. B. Respiration, CO₂-Assimilation, Transpiration und insbesondere Zell- und Blattwachstum) ist die Translokation von Assimilaten relativ wenig anfällig für Trockenstress (Ehlers und Goss, 2003). In einem laufenden Versuch mit 16 Winterweizen-Genotypen auf einem zu Trockenheit neigenden Sandstandort (Warmse) sowie einem tiefgründigen Lössstandort (Söllingen) werden die Stängel-WSC bestimmt. Der Anteil der aus den Stängeln verlagerten Assimilate am Kornertrag betrug in Warmse durchschnittlich 23 % und in Söllingen 19 % (Abbildung 2-2).

Abbildung 2-2: Kornertrag mit dem Anteil der während der vegetativen Entwicklungsphase gebildeten Assimilate von 16 Winterweizengenotypen an den Standorten Warmse und Söllingen im Mittel der Jahre 2015 und 2016



Quelle: S. Schittenhelm (2017).

Eine Beregnung während der späten Kornfüllungsphase kann die Abreife verzögern und durch eine schlechte Ausnutzung der Stängel-WSC den Ernteindex und mithin den Kornertrag negativ beeinflussen (Zhang et al., 2013). Für eine detaillierte Kosten-Nutzen-Abwägung zwischen Abreife und Assimilatverlagerung in Abhängigkeit von der Wasserversorgung sind weitere Versuche mit den verschiedenen Getreidearten erforderlich.

Wie viel Kraut braucht die Kartoffel?

Bewässerungsempfehlungen zufolge soll die Kartoffel zwischen Blüte und Krautabreife bewässert werden, weil der Beginn des schnellen Knollenwachstums etwa mit dem Zeitpunkt der Blüte zusammenfällt. Es war aber bisher unklar, ob diese Empfehlung auf alle Sorten gleichermaßen zutrifft. Bei der Kartoffel unterscheidet man Blatt- und Stängeltypen, wobei Blatttypen relativ wenig, Stängeltypen dagegen viel Kraut ausbilden. Zur Klärung der Abhängigkeit von Krautwachstum und Bewässerungsbedarf wurden in einem dreijährigen Bewässerungsversuch die Sorten Producent (Blatttyp) und Tomba (Stängeltyp) verglichen (Schittenhelm et al., 2006). Während das Versuchsjahr 2001 hinsichtlich der Niederschlagsmenge (336 mm) zwischen Pflanzung und vollständiger Abreife dem langjährigen Mittel entsprach, war das Jahr 2002 (491 mm) sehr nass und

das Jahr 2003 (254 mm) ausgesprochen trocken. Im Trockenjahr 2003 hatte die Sorte Producent im Gegensatz zu Tomba ohne Bewässerung den Bestand Ende Juni noch nicht geschlossen (Abbildung 2-3).

Abbildung 2-3: Die Sorten Producent und Tomba ohne und mit Zusatzbewässerung in Braunschweig am 26.06.2003



Quelle: S. Schittenhelm (2017).

Bei guter Wasserversorgung im Jahr 2002 hatten die beiden Sorten vergleichbare Trockenmasseerträge. Im Normaljahr 2001 war Tomba gegenüber Producent leicht (+9 %) und im Trockenjahr 2003 sehr stark (+48 %) überlegen. Aus diesem Experiment lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- (1) Trockenheit beeinträchtigt den Knollenertrag über einen niedrigen Blattflächenindex ($LAI < 4$) und eine entsprechend verringerte Strahlungsaufnahme des Bestandes.
- (2) Besonders bei Sorten mit niedrigem Blattflächenindex ist bei Trockenheit eine Bewässerung auch vor der Blüte sinnvoll.
- (3) Das genetische Potential zur Ausbildung einer großen Krautmasse ist eine Art Versicherung gegen Trockenheit.

Bewässerung in Fruchtfolgen

Der Bewässerungsbedarf hängt nicht nur von Fruchtart und Witterungsverlauf ab, sondern auch davon, wie viel Bodenwasser die Vorfrucht hinterlässt. Das Zweifruchtsystem beim Energiepflanzenanbau ist darauf ausgerichtet, durch eine ganzjährige Bodenbedeckung eine hohe Flächenleistung zu erzielen (Karpenstein-Machan, 2005). Die Erstfrucht wird im Herbst ausgesät und im folgenden Jahr noch vor der Vollreife geerntet. Es folgt eine sommerannuelle Zweitfrucht mit einer je nach Erntetermin der Erstfrucht (Mai oder Juni) mehr oder weniger stark verkürzten Wachstumszeit. Im Vergleich zum Hauptfruchtanbau mit nur einer Biomasseernte pro Jahr werden beim

Zweifruchtanbau nur dann höhere Erträge erzielt, wenn die Zweitfrucht rasch aufläuft und sich danach zügig weiterentwickelt. Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Wasserversorgung. Ein Anbausystemvergleich von Zweifruchtnutzung mit (a) früher bzw. (b) später Ernte der Erstfrucht Winterroggen gefolgt von den Zweitfrüchten Mais, Futterhirse und Sudangrashybride und (c) einem reinen Hauptfruchtanbau dieser sommerannuellen Kulturen ergab stark unterschiedliche Bewässerungseffekte (Schittenhelm et al., 2011). Die Mehrerträge waren beim Hauptfruchtanbau am niedrigsten und bei Zweifruchtnutzung mit später Erstfruchternte am höchsten (Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Mittlere absolute und relative bewässerungsbedingte Mehrerträge an Trockenmasse der Biogaspflanzen Mais, Futterhirse und Sudangrashybride in Abhängigkeit von Anbausystem, Standort und Jahr

Anbau-system	2008						2009					
	Braun-schweig		Rheinstetten-Forchheim		Münche-berg		Braun-schweig		Rheinstetten-Forchheim		Münche-berg	
	t ha ⁻¹	%	t ha ⁻¹	%	t ha ⁻¹	%	t ha ⁻¹	%	t ha ⁻¹	%	t ha ⁻¹	%
HF	7,8	54	6,0	39	3,3	25	7,0	51	4,0	27	3,9	25
ZF _f	6,4	45	5,9	38	3,7	39	7,2	56	5,1	39	5,4	41
ZF _s	5,5	55	5,1	41	6,3	87	11,4	223	7,3	86	5,4	46

HF = Hauptfruchtanbau

ZF_f = frühe Zweifruchtnutzung Anfang bis Mitte Mai

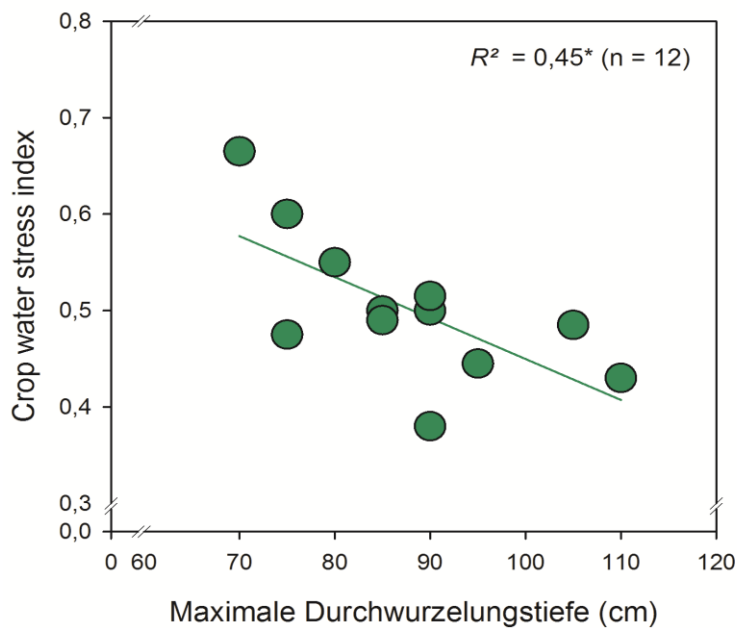
ZF_s = späte Zweifruchtnutzung Anfang Juni

Quelle: Schittenhelm et al. (2011).

Die Bedeutung der Wurzel für die Wasseraufnahme

Ein gut ausgebildetes Wurzelsystem ist die Voraussetzung, um Bodenwasser und Nährstoffe vollständig erschließen und aufnehmen zu können. So kann durch Kulturen bzw. Sorten mit einem tiefen Wurzelsystem Beregnungswasser eingespart werden, wenn sich dadurch Wasser aus tieferen Bodenschichten erschließen lässt. Bei einem Vergleich eines europäischen Winterweizensortiments auf verschiedenen Standorten zeigten sich signifikante Unterschiede in der Durchwurzelungstiefe und -intensität. Außerdem wurde deutlich, dass die Wurzeldichte in tieferen Bodenschichten mit einem hohen Kornertrag einhergeht, vorausgesetzt in tieferen Bodenschichten war auch tatsächlich Wasser vorhanden (Kottmann et al., 2016). Wurzeluntersuchungen sind sehr zeitaufwändig und arbeitsintensiv. Da die Bestandestemperatur mit der Wurzeldichte/-tiefe in Beziehung steht, kann man versuchen, mit ihrer Hilfe indirekte Informationen über das Wurzelsystem zu erhalten (Lopes & Reynolds, 2010). Die Temperaturmessung kann z. B. mittels einer Infrarotkamera erfolgen, welche an einem unbemannten Luftfahrzeug montiert ist (Langkamp et al., 2017). Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes 'Phaenokopter' wurde ein Zusammenhang zwischen Wurzeltiefgang und einem aus der Bestandestemperatur abgeleiteten Stressindex, dem 'Crop Water Stress Index' (CWSI; Jackson et al., 1981), gefunden (Abbildung 2-4).

Abbildung 2-4: Beziehung zwischen maximaler Durchwurzelungstiefe und dem Crop Water Stress Index in Warmse 2015. (*: Signifikant für $P < 0,05$)

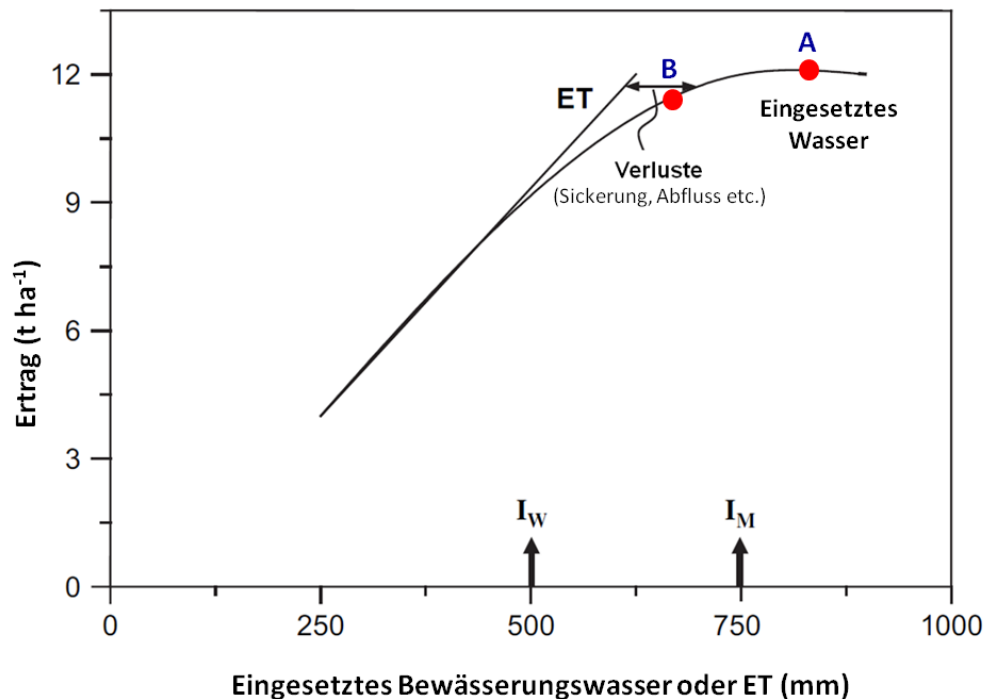


Quelle: L. Kottmann (2017).

2.6 Die aktuelle globale Situation der Bewässerung

Nach Meinung von Fereres und Soriano (2007) wird die Bewässerungslandwirtschaft in vielen Gebieten der Erde unter vollständiger Vernachlässigung der Grundprinzipien von Ressourcenschutz und Nachhaltigkeit praktiziert. Sie erwarten, dass eine unzureichende Wasserverfügbarkeit für Bewässerungszwecke künftig eher die Regel als die Ausnahme sein wird. Aus diesem Grund wird sich das Bewässerungsmanagement ihrer Meinung nach von der Betonung der Produktion pro Flächeneinheit in Richtung Maximierung der Produktion pro Einheit verbrauchten Bewässerungswassers (z. B. Liter Wasser pro kg Ernteprodukt) verschieben. Dabei kann man sich die Tatsache zunutze machen, dass die Ertragswirksamkeit mit höheren Bewässerungsmengen abnimmt (Abbildung 2-5).

Abbildung 2-5: Beziehung zwischen eingesetztem Bewässerungswasser, Evapotranspiration (ET) und Ertrag. I_W und I_M repräsentieren die Wassermengen, ab denen die Produktivität des Bewässerungswassers abnimmt bzw. der Ertrag nicht mehr weiter zunimmt



Quelle: Fereres & Soriano (2007) sowie Schneekloth & Andales (2017) (verändert).

Bei der Annäherung an den Maximalertrag treten zunehmend stärkere Wasserverluste auf, weil der Boden im Bereich der Feldkapazität stärker anfällig für Wasserverluste in Form von Sickerung und Abfluss wird. Eine starke Reduzierung der Menge an Bewässerungswasser (von Punkt A zu Punkt B) hat einen lediglich geringen Ertragsverlust zur Folge.

Seit Anfang der 2000er Jahre wird insbesondere in ariden und semi-ariden Ländern die wassersparende Bewässerungsstrategie der Defizitbewässerung und ihrer Weiterentwicklung, das teilweise Austrocknen der Wurzelzone (partial root-zone drying, PRD), mit verschiedenen landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturarten erforscht (Sepaskhah und Ahmadi, 2010). Beim PRD werden abwechselnd Teile der Wurzelzone ausgetrocknet bzw. bewässert. Besonders leicht lässt sich das PRD durch alternierende Furchenbewässerung z. B. mit Kartoffel und Tomate praktizieren.

2.7 Fazit

Eine verbreitete Praxis in den großen Beregnungsverbänden ist die Begrenzung der Beregnungsmenge auf 80 bis 100 mm pro Hektar und Jahr, wobei der unterschiedlichen Beregnungsbedürftigkeit und -würdigkeit verschiedener Kulturen Rechnung getragen wird. Diese Beregnungsmengen stellen im Prinzip eine Art von Defizitbewässerung dar, weil für eine am Evapotranspirationsbedarf orientierte optimale Bewässerung (zumal in Trockenjahren) weit höhere Wassermengen notwendig wären. Die Bewässerungslandwirtschaft in Deutschland ist demnach im internationalen Vergleich als relativ nachhaltig und ressourcenschonend einzustufen. Zukünftiger Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der optimalen zeitlichen Verteilung des verfügbaren Bewässerungswassers, der unterschiedlichen Bewässerungsstrategie, je nachdem ob ganze Pflanzen (Futter- und Biogaspflanzen) oder Pflanzenteile (Nahrungspflanzen) geerntet werden, sowie Sortenunterschieden in der Effizienz der Assimilateverlagerung aus dem Getreidestängel in die Körner. Ein neues und spannendes Forschungsfeld im Bereich der Beregnungssteuerung ist eine fernerkundlich am Wasserstatus des Pflanzenbestandes (z. B. über die Bestandestemperatur) orientierte Bewässerung.

Förderung

Die der vorliegenden Veröffentlichung zugrundeliegenden Forschungsvorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FKZ 22002705 und 22013509) sowie die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (FKZ 2814600213) finanziell unterstützt.

Literatur

- Ehdaie B, Alloush G A, Waines J G (2008) Genotypic variation in linear rate of grain growth and contribution of stem reserves to grain yield in wheat, *Field Crop Research* 106: 34-43
- Ehlers W, Goss M (2003) *Water Dynamics in Plant Production*, CABI Publishing, Wallingford, UK
- Fereres E, Connor D J (2004) Sustainable water management in agriculture. In: Cabrera E, Cobacho R, eds. *Challenges of the New Water Policies for the XXI Century*, Lisse, The Netherlands, pp. 157-170
- Fereres E, Soriano M A (2007) Deficit irrigation for reducing agricultural water use, *Journal of Experimental Botany* 58: 147-159
- Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, Pinter P J (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator, *Water Resources Research* 17: 1133-1138.
- Karpenstein-Machan M (2001) Sustainable cultivation concepts for domestic energy production from biomass, *Critical Reviews in Plant Sciences* 20: 1-14
- Kottmann L, Wilde P, Schittenhelm S (2016) How do timing, duration, and intensity of drought stress affect the agronomic performance of winter rye? *Europ. J. Agronomy* 75: 25-32

- Kottmann L, Schittenhelm S, Schroetter S, Langkamp T, Kraft M, Matschiner K (2016) Vergleich des Wurzelsystems verschiedener Winterweizengenotypen unter Trockenstress, Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 28: 186-187
- Langkamp T, Kraft M, Neeland H, Matschiner K, Kottmann L, Schroetter S, Schittenhelm S (2017) UAV-gestützte Reflexionsmessungen zur Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter mit Hilfe des NDVI am Beispiel eines Trockenstressversuches, Bornimer Agrartechnische Berichte 93, 378-381
- Lopes M S, Reynolds M P (2010) Partitioning of assimilates to deeper roots is associated with cooler canopies and increased yield under drought in wheat, Functional Plant Biology 37: 147-156
- Schittenhelm S, Sourell H, Löpmeier F J (2006) Drought resistance of potato cultivars with contrasting canopy architecture, European Journal of Agronomy 24: 193-202
- Schittenhelm S, Reus D, Kruse S, Hufnagel J (2011) Assessment of productivity and profitability of sole and double-cropping for agricultural biomass production, Journal für Kulturpflanzen 63: 387-395
- Schittenhelm S, Kraft M, Wittich K P (2014) Performance of winter cereals grown on field-stored soil moisture only, European Journal of Agronomy 52: 247-258
- Schneekloth J, Andales A (2017) Seasonal water needs and opportunities for limited irrigation for colorado crops, Colorado State University Fact Sheet No. 4.718, Online verfügbar unter <http://extension.colostate.edu/docs/pubs/crops/04718.pdf>.
- Sepaskhah A R, Ahmadi S H (2010) A review on partial root-zone drying irrigation, International Journal of Plant Production 4: 241-258
- Steduto P, Hsiao T C, Fereres E (2007) On the conservative behavior of biomass water productivity, Irrigation Science 25: 189-207
- Yang J, Zhang J, Wang Z, Zhu Q, Liu L (2001) Water deficit-induced senescence and its relationship to the remobilisation of pre-stored carbon in wheat during grain filling, Agronomy Journal 93: 196-206
- Zhang Y P, Zhang Y H, Xue Q W, Wang Z M (2013) Remobilization of water soluble carbohydrates in non-leaf organs and contribution to grain yield in winter wheat under reduced irrigation, International Journal of Plant Production 7: 97-116

3 Hydrologische und biologische Vielfalt in der Agrarlandschaft – vernachlässigte Aspekte und Lösungsansätze

Prof. em. Heiko Diestel

TU Berlin

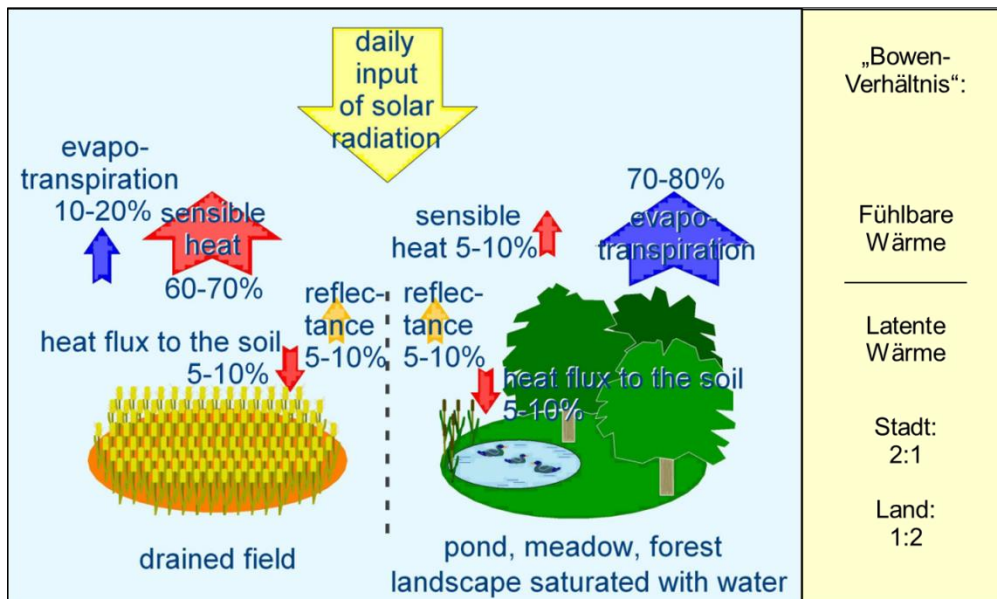
3.1 Zusammenfassung

Im Sommer hängen auf dem eurasischen Kontinent die Niederschläge stark von der über Land entstehenden Luftfeuchte ab. Die Sonnenenergie kann in abwechslungsreichen Landschaften, die feuchte Zonen enthalten, eine Vielfalt von Wasserkreisläufen entstehen lassen. Wärmeströme sind mit den Wasserkreisläufen gekoppelt. Flora, Fauna und Böden sind entscheidende Prozess-träger. Wärme- und Wasserhaushalte sind durch die Landnutzung des Menschen in den vergangen 150 Jahren drastisch verändert worden. Es werden Maßnahmen zur Wiederherstellung günstiger Wasser- und Energiebilanzen in den Landschaften vorgeschlagen, die im Wesentlichen aus Vorkehrungen zum dezentralen Rückhalt von Wasser und zur Steigerung der Verdunstung bestehen. Sie gleichen unter vielen Bedingungen den Vorgehensweisen zur Herstellung von Biotoptverbünden und biologischen Trittsteinen, denn Naturschutz und hydrologisch-energetischer Prozessschutz sind synergetisch verknüpft.

3.2 Einleitung

In abwechslungsreichen Landschaften, welche feuchte Zonen enthalten, entsteht durch die natürlichen Rückkopplungsprozesse eine Vielfalt von kleinen Wasserkreisläufen. Die Wasserkreisläufe in einer Landschaft, die mit dem Wechsel der Phasen des Wassers ineinander (Kondensation/Verdunstung) einhergehen, sind Prozesse der Umwandlung von Energie. Ein großer Teil der einfallenden Sonnenenergie wird durch die Evapotranspiration in sogenannte „latente“ Wärme umgewandelt, die nicht zu einer Erwärmung der Umgebung führt. Sonnenstrahlung, die nicht in latente Wärme umgewandelt wird, erhitzt jeden Gegenstand, den sie erreicht: sie wird zu fühlbarer Wärme. In einer ausgetrockneten Landschaft gehen bis zu 60 % der Sonnenstrahlung in fühlbare Wärme über, in einer feuchten Landschaft bis zu 80 % in die Verdunstung, also in „latente“, nicht fühlbare Wärme. Das „Bowen-Verhältnis“ von fühlbarer zu latenter Wärme liegt bei offenen Landschaften bei 1:2, über versiegelten Flächen und Siedlungen bei 2:1. Die Vegetation, die Böden und die Fauna sind entscheidende Prozess-träger und beeinflussen die Prozesse in der Luftschicht ihrer Landschaft (Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Aufteilung der eintreffenden Strahlungsenergie in fühlbare und latente Wärme



Quelle: Kravčik et al. (2008), www.waterparadigm.de, Ergänzung H.Diestel.

Auf globaler Ebene sind die Niederschläge auf die Landmassen ($113.000 \text{ km}^3/\text{a}$) zu einem ganz erheblichen Anteil (etwa 65 %) landbürtig. Von den $413.000 \text{ km}^3/\text{a}$, die von den Ozeanen verdunsten, werden lediglich $40.000 \text{ km}^3/\text{a}$, knapp 10 %, auf die Landmassen transportiert und gleichen dort die gleich große Menge an Oberflächenabflüssen ins Meer aus (Gimeno et al., 2012). Über Land mischt sich der meer- und landbürtige Wasserdampf, um dann jeweils zu Wolken bzw. Niederschlägen zu kondensieren. Für den eurasischen Kontinent ergibt sich aus den Forschungen von Numaguti (1999), dass im Winter der größte Anteil des Wasserdampfes ozeanischen Ursprungs ist, im Sommer dagegen vorrangig aus Kreisläufen über dem Land stammt. Im Sommer hängt die Regenergiebigkeit der vom Atlantik kommenden Luftmassen stark von der über Land vorliegenden Luftfeuchte ab. Diese Tatsache wird bisher von der Wasserwirtschaft eher vernachlässigt.

Seit etwa 150 Jahren verändern sich die Landschaften in Deutschland durch die Melioration und die Ausdehnung von Siedlungs- und Verkehrsflächen. Wie waren die Lokalklimate und die Abflussverhältnisse in den Landschaften Europas vor den großen Entwässerungen, Flussbegradigungen, Grundwasserabsenkungen und Abholzungen in trockenen, mittleren und nassen Jahren? Im Mittelpunkt der Publikationen der Jahrzehnte der ‚Meliorationen‘ standen die Vorteile, die sich für den Ackerbau durch die Dränungen ergaben. Die vielfältigen ökologischen Konsequenzen wurden damals nicht als vorrangiges Forschungsthema gesehen. Der dramatische Rückgang der Pflanzen- und Tierarten auf entwässerten landwirtschaftlichen Nutzflächen, Mooren und Niedermoorstandorten ist mittlerweile recht umfassend dokumentiert. Bezüglich der Änderungen einzelner Komponenten des Wasserhaushaltes als Folge der Einrichtung von Vorflutern und Dränungen gibt es einige, sich teilweise widersprechende Informationen (siehe u. a. Wohlrab et

al., 1992). Änderungen der auf den Phasenwechseln des Wassers beruhenden Wärmeregulierungsprozesse in den Landschaften durch die Melioration wurden kaum quantifiziert. Untersuchungen der Einflüsse der großflächigen Entwässerung auf das Lokalklima und hier besonders auf die Verdunstung aus Landschaftselementen gestalten sich schwierig, da es an genügend großen, durch Entwässerungen nicht beeinflussten Flächen fehlt.

Durch die in Deutschland täglich wachsenden, etwa 50 Millionen ha Siedlungs- und Verkehrsflächen (www.umweltbundesamt.de/daten/), hat die verbleibende landwirtschaftliche Nutzfläche heute eine ökologisch noch größere Bedeutung als im 19. Jahrhundert. Ein versiegelter Hektar Land kann zu einem Verdunstungsverlust von sicherlich 2000 m³/a führen und verschlechtert das Bowen-Verhältnis. Die Parzellengröße hat sich nicht nur durch Flurbereinigungen und Meliorationen vergrößert. Der Trend zu immer größeren Schlägen setzt sich als Folge der Vergrößerung der landwirtschaftlichen Maschinen und betriebs- sowie marktwirtschaftlicher Sachzwänge fort. Im Zusammenhang mit dem hier angeschnittenen Thema ist der problematische Aspekt hierbei die Verringerung der Verdunstung durch fehlende Hecken, Knicks, Baumgruppen und Buschbestände sowie durch die vegetationsfreien Flächen ab Mitte des Sommers.

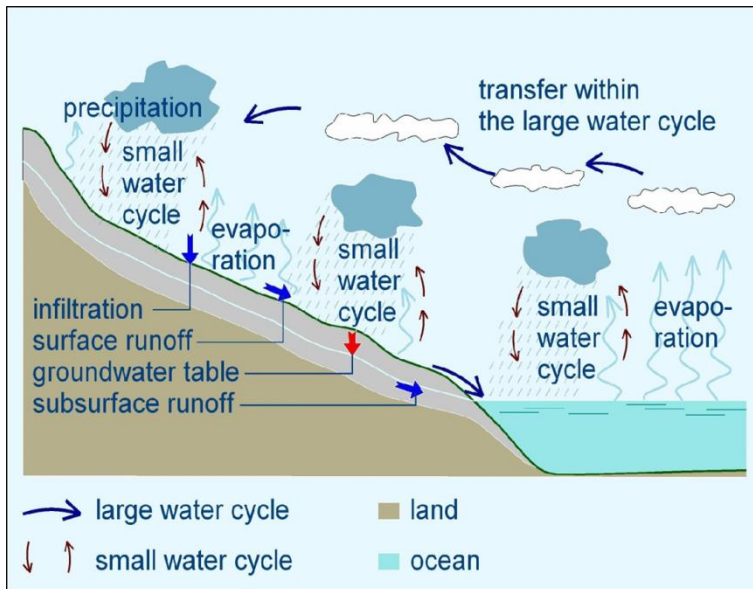
Abbildung 3-2: Temporäre Wüste am 22.08.2017 nahe Volzum in Niedersachsen (von NNO nach WSW, im Hintergrund Elm und Asse)



Quelle: H. Diestel (2017).

Abbildung 3-2 zeigt eine typische „temporäre Wüste“. Getreide (und oft auch Raps) ist in dieser Jahresphase in der Regel bereits geerntet. Auf den hier zu sehenden, auch biologische Sperren bildenden etwa 300 ha Fläche, findet nun viele Wochen lang keine Verdunstung – bei Bewuchs tausende von Kubikmetern – mehr statt. In Verbindung mit der Verdunstung aus dem Elm (im Hintergrund im Osten) und der Asse (im Hintergrund im Süden) sowie der meerbürtigen Luftfeuchte, könnten in dieser Zeit hier sicherlich etliche Millimeter Niederschlag generiert werden. Kravčík et al. (2008) beschreiben einen sich selbst graduell verstärkenden Effekt bei landbürtigen Niederschlägen. Verminderte Verdunstung führt zu einer geringeren Ergiebigkeit des nächsten Niederschlagsereignisses. Das sich daraus ergebende Verdunstungsdefizit verringert dann wiederum die Ergiebigkeit des folgenden Niederschlagsereignisses.

Eine Landschaftseinheit, in der sich kleinere, unterschiedliche Energie- und Wasserbilanzen eingestellt haben, verfügt über eine deutlich erhöhte biologische Vielfalt und über eine höhere Resilienz. Zurückgehaltenes Wasser führt, vorwiegend in tieferen Schichten der Atmosphäre, zu erhöhter landbürtiger Verdunstung und - zusammen mit der eingetragenen meerbürtigen Feuchtigkeit – zu Niederschlägen (Abbildung 3-3).

Abbildung 3-3: Große und kleine Wasserkreisläufe

Quelle: Kravčík et al. (2008), www.waterparadigm.org.

In der Regel wird – wie auch hier in den weiteren Darlegungen – nur der fallende Niederschlag in Betracht gezogen. Produkte der Luftfeuchte, wie abgesetzte Niederschläge (Tau oder Reif) und abgefangener Niederschlag (Nebel oder Rauheif), haben aber in den hier thematisierten Prozessen durchaus wichtige Funktionen. In manchen Gegenden der Welt wird gesammelter Nebel in das Wasserdargebot einbezogen (Ritter et al., 2015).

Rund 30 % der Fläche Deutschlands ist bewaldet (www.umweltbundesamt/daten/). Die Waldfläche, eine Verdunstungsquelle von hoher Bedeutung, hat sogar leicht zugenommen. Das nach einem Regenereignis zunächst an der Vegetation haften bleibende Wasser, das nicht kurzfristig in den Gewässern abfließt, kann bei Fichtenbeständen bis zur Hälfte des Niederschlags ausmachen. Bei jedem Verdunstungsvorgang entsteht Verdunstungskälte. Ein allein stehender Baum kann die Kühlwirkung von 10 Klimageräten erbringen (Kravčík et al., 2008. Siehe auch Diestel, H., 2014, in Weber, K.-F. 2014). Die hydrologischen Wirkungen des Verhältnisses von Laub- zu Nadelhölzern sind eine wichtige Komponente bei Forstplanungen (siehe, beispielsweise, Seradjzadeh, 2007).

Die im Folgenden vorgeschlagenen Vorgehensweisen zur Wiederherstellung günstiger Energie- und Wasserbilanzen in den Landschaften ähneln sehr Maßnahmen wie der Herstellung von Biotopverbünden und biologischen Trittsteinen, die vom Naturschutz gefordert werden. Wasser ist sowohl die elementare organische als auch anorganische Substanz unserer Welt. Effektiver Naturschutz beinhaltet wasserwirtschaftliche und hydrologische Überlegungen (Diestel, 1995). Naturschutz und hydrologisch-energetischer Prozessschutz sind synergetisch verknüpft.

3.3 Erhöhung der Verdunstung durch Zulassung bzw. Förderung einer größeren hydrologischen und biologischen Vielfalt

Synergien

Die Vielfalt geländeklimatischer Prozesse (Bendix, 2004) bietet ein großes Spektrum an Beeinflussungsmöglichkeiten des Wasser- und Energiehaushaltes, wobei das „unsichtbare“ Wasser in der Luft bisher eher vernachlässigt worden ist. Verdunstungs-„Verluste“ werden als verloren gegangene Wassermengen oft nicht weiter wasserwirtschaftlich behandelt. Durch Vorkehrungen zur Intensivierung der Verdunstungsvorgänge und zum dezentralen Rückhalt von Wasser mit einfachen baulichen Maßnahmen, kann die Häufigkeit der Phasenwechsel zwischen dampfförmigem und flüssigem Wasser und die Frequenz der regional entstehenden Niederschlagsereignisse erhöht sowie ein günstiges Verhältnis zwischen den latenten und fühlbaren Wärmeströmen in einer Landschaft herbeigeführt werden. Dies kann aber nur unter Einbeziehung der Organismen (einschließlich der Mikroorganismen) über und im Boden bewirkt und erhalten werden. Ohne Vegetation und die dazugehörige Fauna (Insekten, Vögel, u. a.) können die hier vorgeschlagenen, scheinbar „abiotischen“ Ziele nicht erreicht werden. Mayr (1998) hat die Eigenschaften lebender Organismen genannt, die sie dazu befähigen, einen ausgeglichenen Naturhaushalt herbeizuführen, der den physischen Gegebenheiten des Standortes angepasst ist. Es sind die Fähigkeiten zur Evolution, zur Selbstreplikation, zum Wachstum und Differenzierung mit Hilfe eines genetischen Programms, zum Stoffwechsel, zur Bindung und Freisetzung von Energie, zur Selbstregulierung, um das komplexe System im stabilen Gleichgewicht zu halten, zur Reaktion auf Umweltreize sowie zur Veränderung auf den Ebenen des Phänotyps und des Genotyps. Kulturtechnische und wasserwirtschaftliche Maßnahmen sind also immer nur ein Mittel, um Lebewesen dazu zu veranlassen, bestimmte Prozesse in den Wasserkreisläufen und Energieflüssen der Landschaft auszulösen, an ihnen teilzunehmen und sie aufrechtzuerhalten.

Agroforstwirtschaft

Die Kombination von Feldfrüchten oder Grünland mit Bäumen oder mehrjährigen Gehölzen ist eine Anbauform, die nicht nur hohe Flächenproduktivität mit Naturschutz kombiniert, sondern auch den oben genannten Zielen entgegenkommen kann. Es ist eine sehr alte Form der Landwirtschaft, die in früheren Zeiten allerdings eher selten in klarer geometrischer Anordnung praktiziert wurde. Die Abstände zwischen den Gehölzreihen können heute den Breiten moderner landwirtschaftlicher Maschinen angepasst werden, um ihren Einsatz störungsfrei zu ermöglichen. Es werden Werthölzer, die erst langfristig Gewinn bringen oder Bäume, die relativ kurzfristig verwertbares Holz oder Früchte erbringen, gepflanzt. Diese besonders für das Flachland und Mittelland geeignete Nutzungsform kann vielerlei ökologische Vorteile und ökonomischen Gewinn erbringen. Die Pflanzen können sich gegenseitig positiv beeinflussen oder das Risiko von Ernteauffällen und Preisschwankungen kann verringert werden (siehe u. a. BMBF, 2009). Gehölzreihen können als Uferrandstreifen zusätzliche positive Wirkungen erbringen.

Die Prozesse, die sich in den Baumbeständen der Wälder im Wechselspiel mit den unterschiedlichen Komponenten des Wasserhaushaltes abspielen, sind komplex aber bereits recht gut untersucht (Brechtel, Baumgartner in Baumgartner und Liebscher, 1990, Müller, 2011). Bäume und Sträucher haben im Sommer hohe Verdunstungsraten, halten Niederschläge auf ihrem Blattwerk zurück und fördern die Tau- und Reifbildung. Im Winter reichern laubwerfende Bäume und Sträucher das Grundwasser durch Stammabfluss an. Dieses zusätzliche Grundwasser kann im Frühjahr zu erhöhten Verdunstungsraten führen.

Ob ein Agroforstsystem oder Gehölze in der Summe eine Verengung der Zyklen von Verdunstung und Niederschlag bewirken, hängt von etlichen Faktoren ab, wie Bodenart, Abstand und Ausrichtung der Gehölzreihen oder Hecken, Art und Alter der Gehölze, Relief und Bewuchs des Umfeldes, lokale Winde, Großwetterlagen oder der Auffüllung der Grundwasserreserven im Winter. Ähnliches gilt für die im Weiteren beschriebenen Vorkehrungen zur „Wiedereinräumung“ der „ausgeräumten“ Landschaften. Der Bericht des Julius Kühn-Institutes (Lamerre et al., 2016) bietet einen Einblick in die Komplexität eines Agroforstsystems und in die Unterschiedlichkeit der dort auch diskutierten Forschungsergebnisse aus der Literatur. Kaeser et al. (2010) berichten, dass die Baumreihen im Agroforstsystem den Oberflächenabfluss verringern, die Interzeption erhöhen und Hochwasserabflüsse senken. Durch derartige Anbausysteme wird unter den meisten Gegebenheiten die lokale Verdunstung in der Phase vom Ernteabschluss für Feldfrüchte wie Getreide und Raps bis etwa zum November erhöht. Agroforstsysteme bieten sich dafür an, auf ihren Flächen sowohl die Ziele der Erreichung günstiger Wasser- und Energiebilanzen als auch die Anliegen des Naturschutzes umzusetzen.

Offenbar sind Raten der aktuellen Evapotranspiration aus Baum- und Gehölzreihen selten gemessen worden. Sie sollten unbedingt Teil zukünftiger Untersuchungen werden.

Dezentraler Rückhalt von Regenwasser

Es gibt vielfältige Formen des dezentralen Rückhaltes von Regenwasser. Dazu gehören die Renaturierung von Fließgewässern und Mooren, Rehabilitation von Flussauen, Erhaltung von Feuchstellen und Stillgewässern wie Sölle und Teiche, Terrassierungen, Erdwälle oder jede Maßnahme zur Verhinderung der Erosion durch Wasser einschließlich geeigneter Bodenbearbeitungsmaßnahmen. Die blühenden prähispanischen Kulturen an der Westabdachung der Anden beruhten auf dem gezielten dezentralen Rückhalt von Niederschlagswasser (Diestel, 2016). „Water harvesting“ ist inzwischen auf internationaler Ebene zu einer vielerorts angestrebten Kultur-Technik geworden. Die hierzu vorhandene informative und umfangreiche Fachliteratur kann hier nicht besprochen werden. Jedes Teilvolumen Wasser, das zurückgehalten wird und verdunstet, trägt zur Anreicherung der Luftfeuchte und den dazugehörigen positiven Effekten bei. Der dezentrale Rückhalt von Regen dient auch zur Senkung von Hochwasserspitzen.

Begleitend zu den erwähnten Maßnahmen im ländlichen Raum müssen auch in Siedlungen entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. In vielen Städten wird dieses auch von den Behörden gefördert (z. B. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin, 2010). Dach- und Fassadenbegrü-

nungen finden bereits Verbreitung, Verfahren zur Entsigelung und zur Umleitung des Oberflächenabflusses in das Grundwasser sind weit entwickelt. Das urbane Gärtnern durch Stadtbewohner findet immer mehr Anhänger.

Bewässerung

Die Bewässerung, die in unseren Breiten vorwiegend durch die Feldberegnung stattfindet, kann zu dem in diesem Aufsatz geforderten Prozessschutz beitragen. Voraussetzung dafür ist, dass die Entnahme des Bewässerungswassers nicht zu einer Verringerung der Evapotranspiration im Bereich seiner Gewinnung führt. Diese Voraussetzung ist sicherlich meistens gegeben, da für die Beregnung Wasser aus Gewässern oder aus Grundwasser eingesetzt wird, das aus versickerten Winterniederschlägen stammt. Die beregneten Pflanzen und das Beregnungswasser selbst erhöhen die lokale Verdunstung. Die Herbeiführung von kleinen Wasserkreisläufen, auch im weiteren Umfeld, ist im Interesse von Landwirten, die beregnen müssen. Zusätzliche Niederschläge verringern den Bewässerungsbedarf und erhöhen das Wasserdargebot.

Sträucher, Bäume und sonstige Anpflanzungen

Wo immer sich eine Möglichkeit bietet, Feldgehölze in Form von Bäumen, Sträuchern, Hecken oder Alleen (wieder) anzupflanzen, auch wenn sie zu geringfügigen Einschränkungen bei den Feldarbeiten führen, sollte dies im Interesse der Erreichung der hier skizzierten Ziele forciert werden. Es ist bisher in nur unzureichendem Maße deutlich geworden, dass die Vorteile, die sich durch die Entfernung von „störenden“ Pflanzen ergeben, zu Nachteilen führen, die zwar nicht direkt in den aktuellen finanziellen Betriebsbilanzen erscheinen, aber langfristig sicherlich zu Buche schlagen werden.

Herbst et al. (2007) stellten bei Untersuchungen in Südengland fest, dass die Transpiration aus Hecken (vorwiegend Weißdorn, *Crataegus monogyna* L.) mit Spitzenwerten von 8 mm/Tag typische Transpirationsraten aus Wäldern überstieg. In einem der Versuchsjahre war sie sogar höher als die potentielle Verdunstung. Interessant ist das ebenfalls in Südengland ermittelte Ergebnis von Herbst et al. (2006), dass durch die Hecken mehr als die Hälfte der Niederschlagsmenge, die auf die Fläche gefallen wäre, die von den Hecken eingenommen wurde, durch Interzeption zurückgehalten wurde.

Der Anbau von Zwischenfrüchten stellt ebenfalls einen Beitrag zur Erhöhung der Verdunstung dar. Daten zur Interzeption durch Totholzhecken, die sicherlich nicht unbedeutend ist, konnten im Rahmen der Literaturrecherche für diesen Beitrag nicht gefunden werden.

Änderung der Bringungstechniken in Wäldern

Aufgrund der beobachtbaren Entwicklungen soll hier ein Vorschlag vorgebracht werden, der sich – streng genommen – auf Bereiche außerhalb der landwirtschaftlichen Nutzflächen, nämlich auf die Wälder, bezieht. Durch die heutige Bringungstechnik in Wäldern beträgt der Flächenanteil der Bodenverdichtung durch Befahren auf Forststraßen und Rückegassen einschließlich der Altschä-

den 25-35 %. Hangabwärts führende Rückegassen werden zu Erosionsrinnen und Bächen. Forststraßen leiten das Wasser in die Vorfluter ab. Auf diese Weise wird Wasser den Kreisläufen entzogen. Eine Verringerung der Flächenbeanspruchung für die Walderschließung ist technisch und betriebswirtschaftlich möglich. Die Gassenabstände müssen verdoppelt, künstliche Entwässerungsmaßnahmen und Strukturveränderungen der Waldböden unterlassen werden. Das von Wegekörpern abgeleitete Wasser muss in den Waldflächen versickert werden (K.-F. Weber, persönliche Mitteilung, 2017).

3.4 Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Verbesserungen der Wasser- und Energiebilanzen in der Landschaft

Praktische Fragen bezüglich der Umsetzung einer neuen Landeskultur

Ein Wechsel in der Art der Landnutzung, zusätzliche Pflanzungen sowie Maßnahmen zur Retention von Wasser erfordern einen hohen Aufwand. Für Agroforstflächen wird in etlichen Publikationen darauf hingewiesen, dass diese Anbauform durchaus profitabel sein kann (Bender et al., 2009). Trotzdem müssen Landwirte beim Wechsel in diese Art der Landnutzung unterstützt werden. Hilfestellungen und Möglichkeiten zum Erhalt von Förderung sollen hier kurz skizziert werden. Zudem bieten Beiträge in Böhm (2017) informative Einblicke in das komplexe Thema der Fördermöglichkeiten.

§ 1 des Bundesnaturschutzgesetzes liest sich wie eine Aufforderung, Maßnahmen wie die hier skizzierten umzusetzen. Gehölze und Gehölzreihen, insbesondere entlang der Ufer von Fließgewässern sowie Agroforstflächen, die de facto ökologische Ausgleichsflächen darstellen, bieten eine Umweltleistung und können entsprechend bezuschusst werden. Die Einrichtung von Agroforstsystemen soll durch die Verordnung der EU über die Förderung der ländlichen Entwicklung durch den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) gefördert werden. Die EG-Verordnung Nr. 796/2004 ermöglicht die Vergabe von Beihilfen. Für Flächen mit bis zu 50 Bäumen ha⁻¹ können laut Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft Zahlungsansprüche erhoben werden (Möndel und Mayus, 2006). In der Schweiz können 15 Franken pro Baum und Jahr beansprucht werden. Ein Baum entspricht einer Are (100 m²) ökologischer Ausgleichsfläche (Kaesler et al., 2010).

Nicht alle Landwirte arbeiten gerne für einen anonymen Markt, dessen Mechanismen sie nicht übersehen können und der von internationalen Finanzströmen abhängig ist. Die Einbeziehung der Bewohner einer Region und der Käufer landwirtschaftlicher Produkte in die landwirtschaftlichen Aktivitäten kann sehr hilfreich sein. Viele Menschen sind bereits der Überzeugung, dass es einer gesellschaftlichen Erneuerung bedarf, um innerhalb der sozialen Marktwirtschaft und des Kapitalismus einen anderen Rahmen für Landwirtschaft und Konsum von Nahrungsmitteln zu schaffen und sind bereit, finanzielle Mittel dafür einzusetzen. Ein Beispiel ist die „Regionalwert AG“ im Freiburger Raum (Hiß, 2014), bei der Bürger Aktienanteile an regionalen Betrieben der Land- und Ernährungswirtschaft erwerben. Weltweit entstehen sogenannte „Regionalwähren-

gen“. Sie bieten, wie beispielsweise der „Chiemgauer“ (www.chiemgauer.info), gute Möglichkeiten zur Umsetzung von regionalen Vorhaben.

Es ist vorteilhaft, wenn Kommunen und Landkreise einen Katalog mit konkreten Maßnahmen zum dezentralen Rückhalt von Niederschlagswasser vorhalten, aus dem im Falle von anfallenden Kompensationen kurzfristig ein passendes Projekt umgesetzt werden kann.

Sozioökonomische Aspekte

Die Landwirtschaft liefert unsere Nahrungsmittel, unverzichtbare Produkte, ohne die Leben, Gesundheit und Wohlstand nicht möglich sind. Zu diesem Zweck verändert sie ständig die Böden, die Vegetation und die mit ihr koexistierende Fauna, die Kreisläufe und die Qualität des Wassers sowie das Aussehen der Landschaften, in denen die gesamte Gesellschaft beheimatet ist. Seit einigen Jahrzehnten führt dies zu Diskussionen in der Öffentlichkeit, die im Ergebnis den Stellenwert der Landwirtschaft in unserer Gesellschaft eher senken und meist in unterschiedlichen Forderungen an die Landwirtschaft münden. Sie betreffen bisher vorwiegend die Aufbringung von Pestiziden und Düngern, das Artensterben sowie die Massentierhaltung. Hier wird nun eine weitere, bisher kaum thematisierte Forderung gestellt, nach einer Vergrößerung der Verdunstung. Das ist Anlass zu Überlegungen von grundsätzlicher Natur.

Der Ablauf der Kreisläufe von Wasser sowie die Aufteilung der Einstrahlungsenergie, die für alle wichtig sind, auch für die Stadtbewohner, die bald die Hälfte der Menschheit ausmachen werden, ist in den Forstflächen, in besiedelten Räumen und auf den verbleibenden landwirtschaftlichen Nutzflächen beeinflussbar. In Deutschland ist die Waldfläche glücklicherweise recht stabil. In Siedlungen setzen sich, wenn auch zögerlich, Maßnahmen zum dezentralen Rückhalt von Niederschlagswasser und zur Etablierung von Vegetation auf Dächern und an Fassaden durch (Diestel und Schmidt, 1998). Von dem, was auf den noch verbleibenden landwirtschaftlichen Nutzflächen geschieht, hängt sehr vieles ab. Die Landwirtschaft leistet potentiell über die Sicherung der Verdunstung von ihren Nutzflächen einen positiven Beitrag, der in der öffentlichen Diskussion bisher kaum erscheint.

Hier liegt eine enorme Aufklärungsarbeit vor den Landwirten und ihren Sprechern, interessierten und informierten Bürgern, Wissenschaftlern und Institutionen, die sich dem Naturschutz und der Umweltbildung widmen. Gemeinsame Vorhaben mit forschenden Bürgern („Citizen Scientists“) können sehr wirksam sein. Es muss eines Tages als selbstverständlich gelten, dass eine gesunde Landschaft einen echten Reichtum darstellt und nicht eine abstrakte und idealistische Forderung, die Kosten erzeugt. Es muss sich die Erkenntnis durchsetzen, dass eine die elementaren Naturprozesse schonende Landwirtschaft kein „Wirtschaftszweig“ wie der Maschinenbau oder das Transportwesen ist. Die oft – teilweise auch zu recht – kritisierten Preissteuern und Subventionen stellen bisher funktionierende Werkzeuge dar, die es ermöglichen, dass in unserem jetzigen Wirtschaftssystem der Landwirt sowohl seine Produkte im „regulären“ Markt verkaufen kann als auch seine Leistungen für die „Um-Welt“ honoriert bekommt. Allerdings wird der Bürger, mit

ihm aber auch viele Landwirte, sicherlich zunehmend hinterfragen, welche Anbau-Kulturen dem ursprünglichen Ziel der Landwirtschaft dienen.

Politisch muss über die Bemühung um Fördergelder hinaus auf allen Ebenen daran gearbeitet werden, dass der finanzielle Rahmen und die Strukturen der Landwirtschaft und des Naturschutzes verbessert werden im Wissen darum, dass wir aus dem hier eingenommenen Blickwinkel heraus eine „Agrargesellschaft“ sind und auch bleiben werden, auch wenn immer weniger Menschen in der Landwirtschaft arbeiten. Das Fernziel (eine Vision?) ist eine globale Wertegemeinschaft, von der die planetarischen Ressourcen gemeinsam und koordiniert bewirtschaftet werden. Ob dieses Ziel erreicht werden kann, kann hier nicht erörtert, wohl aber ein Versuch gemacht werden, erste Schritte dorthin zu umreißen, die aktuell und auf regionaler Ebene erprobt und eingeleitet werden können.

3.5 Fazit

Der Mensch kann Teilprozesse des atmosphärischen Geschehens beeinflussen. Trotz beeindruckender Erkenntniszuwächse in der Klimatologie bleiben noch viele Fragen bezüglich der Mechanismen, von denen die großen, globalen und die kleineren, regionalen Wasserkreisläufe und Energieströme gesteuert werden sowie der Wechselwirkungen zwischen ihnen offen. Diese Ungewissheiten werden in der klimatologischen Literatur thematisiert. In der Wissenschaft und in der Öffentlichkeit hat die Sorge um einen Klimawandel aufgrund hoher Treibhausgasausstöße zu einer intensiven Diskussion um die Verringerung solcher Ausstöße geführt. Hierbei gelangen andere Prozesse, die ebenfalls das Klima beeinflussen, zurzeit etwas aus dem Blickfeld. Es bestehen noch große Erkenntnisdefizite. Demzufolge muss auch manches von dem, was in diesem Aufsatz dargelegt wird, einen noch interpretativen Charakter haben. Nicht zuletzt deshalb und angesichts der Dringlichkeit eines zukunftsfähigen Umganges mit den Vorgängen, die unser Leben bestimmen, werden hier die Bedeutung der Verdunstung und die Möglichkeiten zum Umgang mit der „unsichtbaren Komponente“ des Wasserkreislaufes thematisiert. In einem engen Dialog zwischen Land- und Wasserwirtschaft, Kulturtechnik und Klimatologie sind Fortschritte unerlässlich, damit eine gute Pflege des Wasser- und Energiehaushaltes in der Landschaft ermöglicht wird.

Die Fachdisziplin der Kulturtechnik muss Aufgaben wie jene, die hier in großen Zügen dargelegt wurden, in das Zentrum ihres Selbstverständnisses rücken und den Begriff „Melioration“ neu definieren.

Literatur

- Baumgartner A, Liebscher H J (1990) Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie, 673 S. Gebrüder Borntraeger, Berlin/Stuttgart, ISBN 3-443-30001-4
- Bender B, Chalmin A, Reeg T, Konold W, Mastel K, Spiecker H (2009) Moderne Agroforstsysteme mit Werthölzern – Leitfaden für die Praxis, Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF/Forschungszentrum Jülich, Förderkennzeichen 0330621
- Bendix J (2004) Geländeklimatologie, Gebr. Borntraeger, Berlin/Stuttgart, ISBN 3-443-07139-2
- BMBF/Bundesministerium für Bildung und Forschung (2009) Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung, Schlussbericht des Projektes agroforst, www.agroforst.uni-freiburg.de
- Böhm C (Hrsg) (2017) 5. Forum Agroforstsysteme in Senftenberg – Bäume in der Land(wirt)schaft – von der Theorie in die Praxis, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, ISBN 978-3-940471-27-7
- Diestel H (1995) Abschätzungen von Niederschlag – Abfluss – Beziehungen als Grundlage für Schutz- und Entwicklungskonzepte, Fachtagung Perspektiven und Strategien der Fließgewässer – Revitalisierung, Mitteilungen aus der Norddeutschen Naturschutzakademie, 5. Jahrg. H.4: 33-38
- Diestel H, Schmidt M (1998) Wasserwirtschaftliche Vision: Die abflusslose Innenstadt – ein richtiger Ansatz? Dokumentation Zukunft Wasser zum Symposium zur Nachhaltigkeit im Wasserwesen in der Mitte Europas, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie, Berlin: 98-103
- Diestel H (1998) Climate regularity requirements for different land use options: more questions than answers? Proceedings, Conference on Climate Predictions for Agricultural and Resource Management, Australian Academy of Science, Canberra, Australia: 231-244, ISBN 0 642 28331 1
- Diestel H, in Weber KF (2014) Velpker Schweiz und Allertal, Eine Spurensuche, Freilicht- und Erlebnismuseum Ostfalen, Königslutter, EAN 978-933380-35-7
- Diestel H (2017) Dezentraler Wasserrückhalt als Staatsziel, Ein lehrreicher Blick in die Geschichte, Fbr-wasserspiegel 3/16: 21-23. https://issuu.com/ernstundsohn/docs/21341705_shregenwassermanagement201.
- Gimeno L, Stohl A, Trigo R, Dominguez F, Yoshimura K, Yu L, Drumond S, Durán-Quesada A,M, Nieto R (2012) Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation, Reviews of Geophysics, 50, RG4003, Doi: 10.1029/2012RG000389
- Herbst M, Roberts J M, Rosier P, Gowing D (2006) Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England, Agricultural and Forest Meteorology 141:244-256
- Herbst M, Roberts J M, Rosier P, Gowing D (2007) Seasonal and interannual variability of canopy transpiration of a hedgerow in southern England, Tree Physiology 27:321-333
- Hiß C (2014) Regionalwert AG: Mit Bürgeraktien die regionale Ökonomie stärken, Herder Verlag, ISBN 978-3-451-33 453-5

- Lamerre J, Langhof M, Sevke-Masur K, Schwarz K-U, von Wühlisch G, Swieter A, Greef J-M, Dauber J, Hirschberg F, Joormann I, Krestel N, Masur D, Reith C (2016) Schlussbericht zum Vorhaben: Nachhaltige Erzeugung von Energieholz in Agroforstsystemen, Teilprojekt 3: Standort Niedersachsen – Strukturvielfalt und Biodiversität, Laufzeit 1. April 2012 bis 31. August 2015, Berlin 2016, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)
- Kaeser A, Palma J, Sereke F, Herzog F (2010) Umweltleistungen von Agroforstwirtschaft, Die Bedeutung von Bäumen in der Landwirtschaft für Gewässer- und Bodenschutz, Klima, Biodiversität und Landschaftsbild, Forschungsanstalt Agroscope, ART-Bericht Nr. 736, ISSN 1661-7568
- Keller R (1962) Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes, 520 S. Teubner Verlagsges, Leipzig
- Kravčík M, Pokorný J, Koluntiar J, Kováč M, Tóth E (2008) Water for the recovery of the climate – A new water paradigm, ISBN 978 – 80-89089-71-0, www.waterparadigm.org
- Mayr E (1998) Das ist Biologie: Die Wissenschaft des Lebens, 439 S. Spektrum Akademischer Verlag, ISBN 3-8274-0270-0
- Möndel A, Mayus M (2006) Landwirtschaftliche Produktionsverfahren in Agroforstsystemen unter mitteleuropäischen Verhältnissen, Fachtagung Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen, Tharandt, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Müller J (2011) Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands, Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, Heft 12: 37-46
- Numaguti A (1999) Origin and recycling processes of precipitation water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model. J. Geophys. Res. 104, D2:1957-1972, Doi: 10.1029/1998JD200026
- Ritter A, Regalado C, Guerra J C (2015) Quantification of Fog Water Collection in Three Locations of Tenerife (Canary Islands), Water 2015, 7, 3306-3319, doi:10.3390/w7073306 ISSN 2073-4441, www.mdpi.com/journal/water
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin (2010) Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung, ISBN 978-3-88961-140-6
- Seradjzadeh H (2007) Assessment of the impact of different forest management measures on the water yield in the Kassilian catchment, Iran. 83 S. J. Sauerländer's Verlag, ISBN 978-3-7939-0890-6
- Wohlrab B, Ernstberger H, Meuser H, Sokollek V (1992) Landschaftswasserhaushalt, Paul Parey-Verlag, ISBN 3-490-19116-1

4 Landwirtschaftliche Nutzung von behandeltem Abwasser aus Umwelt- und Gesundheitssicht

Manuela Helmecke

UBA

4.1 Einleitung

Die Aufbereitung und Verwendung von Abwasser ist in einigen ariden Regionen der Welt schon lange gängige Praxis. Zu den Anwendungen gehören u. a. die Bewässerung von Parks und landwirtschaftlichen Flächen, die Grundwasseranreicherung sowie die Stützung der Trinkwasserversorgung. Gegenwärtig gewinnt die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser („water reuse“) international wie auch in der EU vermehrt Aufmerksamkeit. So werden die Potenziale des Abwassers als Wasserressource, Nährstoff- und Energiequelle in dem diesjährigen Weltwasserbericht „Abwasser, die ungenutzte Ressource“ hervorgehoben (UNESCO, 2017) und auch bei der Stockholm Water Week thematisiert (SIWI, 2017). Innerhalb der EU soll die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser durch die Festschreibung von Mindestanforderungen gefördert werden.

Aktuell ist Spanien mit über 500 Millionen Kubikmetern pro Jahr das EU-Land mit der größten Menge an aufbereitetem Abwasser, das einer weiteren Nutzung zugeführt wird (BIO, 2015). Ebenso besteht diese Praxis in Portugal, Italien, Griechenland, Zypern und Frankreich – jeweils in unterschiedlichem Umfang und für verschiedene Anwendungsmöglichkeiten (JRC 2014; Bixio, Wintgens 2006; Lazarova et al., 2013). Darüber hinaus bestehen auch außerhalb der mediterranen Mitgliedsstaaten Erfahrungen. Zum Beispiel werden in Torreele, Belgien, 2,5 Millionen Kubikmeter pro Jahr aufwendig aufbereitetes Abwasser zur Grundwasseranreicherung für die indirekte Trinkwassergewinnung genutzt (BIO, 2015; van Houtte et al., 2012). Die herangezogenen Gesetze, Leitlinien oder Normen unterscheiden sich von Mitgliedstaat zu Mitgliedstaat (JRC, 2014). Um die bestehenden unterschiedlichen Regelungen zu harmonisieren, strebt die Europäische Kommission die Festlegung einheitlicher Mindestanforderungen für die landwirtschaftliche Bewässerung mit behandeltem Abwasser an.

4.2 Was plant die EU zur Förderung von Wasserwiederverwendung?

2012 identifizierte die Europäische Kommission (KOM) im „Blueprint für den Schutz der europäischen Wasserressourcen“ die Wasserwiederverwendung für Bewässerungszwecke als eine wesentliche Maßnahme zur Verbesserung der Wasserversorgung in der EU (COM (2012) 673 final, S. 16). In diesem Zusammenhang wurde festgehalten, dass gemeinsame EU-Umwelt- und Gesundheitsstandards erforderlich sind, um die Wasserwiederverwendung zu fördern und „potenzielle Hindernisse im freien Verkehr mit Agrarerzeugnissen“ abzubauen (ebd.).

Diese Absicht wurde im Rahmen des Aktionsplans der EU für die Kreislaufwirtschaft (COM(2015) 614) festgehalten. Bis Ende 2017 strebt die KOM EU-weite Mindestanforderungen für die landwirtschaftliche Bewässerung und Grundwasseranreicherung an, die – wenn möglich – als verbindliche europäische Verordnung auf den Weg gebracht werden sollen. Eine EU-Leitlinie für die „Einbeziehung der Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser in die Wasserplanung und -bewirtschaftung“ wurde schon 2016 veröffentlicht. Für die Erarbeitung dieser Dokumente wurde die sogenannte Ad-hoc Task Group für Wasserwiederverwendung (Water Reuse) unter der Common Implementation Strategy der Wasserrahmenrichtlinie eingerichtet.

Die Gemeinsame Forschungsstelle der EU (Joint Research Centre, JRC) wurde mit der Erstellung eines technischen Berichts beauftragt, der die Grundlage für einen Regelungsvorschlag für EU-Mindestanforderungen darstellen wird. Der erste Entwurf wurde Anfang 2016 vorgelegt und bis zur aktuellen Fassung (Stand: Juni 2017) weiter bearbeitet. Die darin festgehaltenen Parameter und Grenzwerte beruhen auf einer Zusammenstellung von Anforderungen, die sich in den bestehenden Regelwerken der EU-Mitgliedstaaten und in internationalen Richtlinien finden (JRC 2017). Eine Ableitung von einheitlichen europäischen Anforderungen auf Grundlage einer Risikoabschätzung für den EU-Kontext erfolgte nicht. Im Ergebnis werden für vier Parameter (*E. coli*, BSB₅, Suspendierte Schwebstoffe, Trübung) EU-einheitliche Grenzwerte, differenziert nach Nutzungskategorien (Klassen), vorgeschlagen. Ein Teil der vorgeschlagenen Grenzwerte entspricht allerdings lediglich denen der EU-Kommunalabwasserrichtlinie (91/271/EWG) (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Auszug der vorgeschlagenen Qualitätsanforderungen für landwirtschaftliche Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser

Klasse ¹⁾	(Mindest-) Aufbereitung	Qualitätskriterien				
		<i>E. coli</i> (KBE/100 ml)	BSB ₅ (mg/l)	Suspendierte Schwebstoffe (mg/l)	Trübung (NTU)	Zusätzliche Kriterien
A	2. Reinigungsstufe, Filtration, Desinfektion (weitergehende Aufbereitung)	≤10	≤10	≤10	≤5	Legionella spp.: <1,000 KBE/l bei Risiko der Aerosolbildung in Gewächshäusern
B	2. Reinigungsstufe und Desinfektion	≤100	Entsprechend 91/271/EWG		-	Darm-Nematoden (Helminth Eier): ≤1 Ei/l bei Bewässerung von Weideflächen oder Futteranbau
C	2. Reinigungsstufe und Desinfektion	≤1,000			-	
D	2. Reinigungsstufe und Desinfektion	≤10,000			-	

1) Klasse A: für den Rohverzehr bestimmte Feldfrüchte; Klasse B: für den Rohverzehr bestimmte Feldfrüchte ohne direkten Kontakt des essbaren Teils mit dem Bewässerungswasser, für die Weiterverarbeitung bestimmte Feldfrüchte, nicht für den Verzehr bestimmte Feldfrüchte, Klasse C: Tröpfchenbewässerung aller Feldfrüchte (außer bei Rohverzehr und direktem Kontakt des essbaren Teils mit dem Bewässerungswasser), Klasse D: Futter- und Energiepflanzen

Quelle: JRC (2017).

Des Weiteren werden den Mitgliedstaaten die Durchführung eines Risikomanagementansatzes und die Berücksichtigung zusätzlicher Schutzmaßnahmen empfohlen. Aufbauend auf der Risikobewertung sollen weitere Anforderungen abgeleitet werden. Allerdings enthält der bisher vorliegende Entwurf keine ausreichend konkreten Vorgaben zur Durchführung einer Risikobewertung und schafft somit keine Grundlage für ein einheitliches und vergleichbares Vorgehen. Aus Sicht des Umweltbundesamts (UBA) werden die vorgeschlagenen Anforderungen dem Anspruch, eine sichere Wasserwiederverwendung zu gewährleisten, nicht gerecht (UBA, 2017). Zu diesem Ergebnis gelangen auch die Europäische Lebensmittelbehörde und das *Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks* in ihren Einschätzungen (EFSA, 2017, SCHEER, 2017).

Voraussichtlich Ende Oktober 2017 wird das „Regulatory Scrutiny Board“ eine Aussage treffen, ob der Vorschlag für eine Verordnung für EU-Mindestanforderungen gerechtfertigt ist.

Die folgenden Aspekte sollten dabei berücksichtigt werden.

Bestehende relevante Regelungen und Leitlinien

Für den Schutz von Oberflächengewässern und Grundwasser besteht in der EU schon heute ein substanzielles europäisches Regelwerk.

Folgende Prinzipien und Qualitätsziele zur Vermeidung und Minderung von Schadstoff- und Nährstoffeinträgen sind im Kontext der Wasserwiederverwendung besonders relevant und müssen eingehalten werden:

- das Verschlechterungsverbot für Grundwasser und Oberflächengewässer (Artikel 4 der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL – 2000/60/EG)),
- die EU-weiten Qualitätsnormen sowie die national festgelegten Schwellenwerte für Grundwasser (Anhang I und II der Grundwasserrichtlinie (GWRL – 2006/118/EG, verändert durch die Richtlinie 2014/80/EU)),
- das Verbot einer direkten Einleitung von Schadstoffen des Anhangs VIII der WRRL in das Grundwasser (Artikel 11.3(j) WRRL und Artikel 6 GWRL) – dies beinhaltet unter anderem Stoffe mit karzinogenen oder mutagenen Eigenschaften, solche mit endokriner Wirkung sowie persistente und bioakkumulierende organische toxische Stoffe,
- die Anforderungen an Einleitungen aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen entsprechend Anhang I (Tabelle 1 sowie Tabelle 2 für empfindliche Gebiete) der Kommunalabwasserrichtlinie (91/271/EWG),
- die Regeln der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft (Anhang II) und zu ergreifende Maßnahmen (Anhang III) für die Sicherstellung einer angepassten Düngung entsprechend der Nitratrichtlinie (91/676/EWG).

Darüber hinaus bestehen im Bereich des Lebensmittelrechts Verordnungen über die Lebensmittelhygiene (853/2004/EG) und zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln (1831/2003/EG) sowie ein Leitfaden zur Eindämmung mikrobiologischer Risiken durch gute Hygiene bei der Primärproduktion von frischem Obst und Gemüse (2017/C 63/01).

Des Weiteren geben international beispielsweise die Leitlinie der WHO (2006) für die sichere Verwendung von Abwasser sowie die ISO-Norm 16075 (2015) Empfehlungen für die Nutzung von aufbereitetem Abwasser. Wesentliche nationale Regelwerke sind unter anderem die der USA (US EPA, 2012) oder aus Australien (NHMRC, 2006). Innerhalb der EU haben bisher sechs Mitgliedstaaten (Spanien, Zypern, Italien, Griechenland, Frankreich, Portugal) Regelungen für die Wasserwiederverwendung erlassen (BIO, 2015). In Deutschland gibt es keine gesetzlichen Vorgaben für die Wasserwiederverwendung. In DIN-Normen sind Toleranzbereiche verschiedener Metalle und Halbmetalle für Bewässerungswasser (DIN 19684-10) und Anforderungen für hygienische Belange von Bewässerungswasser (DIN 19650) festgehalten, die auch für Bewässerungswasser aus aufbereitetem Abwasser herangezogen werden können.

Tabelle 4-2: Beispiele für hygienisch-mikrobiologische Anforderungen an Bewässerungswasser für verschiedene Anwendungen

Eignungs- klasse (EK)	Anwendung	Intestinale Enterokokken Koloniezahl pro 100 ml	<i>E. coli</i> - Koloniezahl pro 100 ml
1 ^{1),2)} (Trink- wasser)	alle Gewächshaus- und Freilandkulturen	Nicht nachweis- bar	Nicht nachweis- bar
2 ^{1),2),3)}	Freiland- und Gewächshauskulturen für den Rohverzehr, öffentliche Parkanlagen	<100	<200
3 ^{1),2),3)}	Nicht zum Verzehr bestimmte Gewächshauskulturen, Freilandkulturen für den Rohverzehr (Gemüse und Obst), Gemüse bis zwei Wochen vor der Ernte, Obst und Gemüse zur Konservierung, Grünland oder Grünlandpflanzen bis zwei Wochen vor dem Schnitt oder der Beweidung	<400	<2000
4 ^{3),4)}	Wein und Obstkulturen zum Frostschutz, Nichtnahrungs- pflanzen zur industriellen Verarbeitung Futter zur Konservierung bis zwei Wochen vor der Ernte	Abwasser, das mindestens eine biologische Reinigungsstufe erfahren hat.	

1) Salmonellen: nicht nachweisbar in 1000 ml.

2) potenziell infektiöse Stadien von Mensch- und Haustierparasiten pro 1000 ml: nicht nachweisbar (Untersuchung nur bei Verdacht nach Anordnung).

3) Wenn durch das Bewässerungsverfahren eine Benetzung der zum Verzehr geeigneten Teile der Ernteprodukte ausgeschlossen ist, entfällt eine Einschränkung nach hygienisch-mikrobiologischen Eignungsklassen.

4) Bei der Beregnung muss durch Schutzmaßnahmen sichergestellt werden, dass Personal und Öffentlichkeit keinen Schaden nehmen.

Quelle: DIN 19650 (Auszug).

Kein flächendeckender Bedarf in der EU

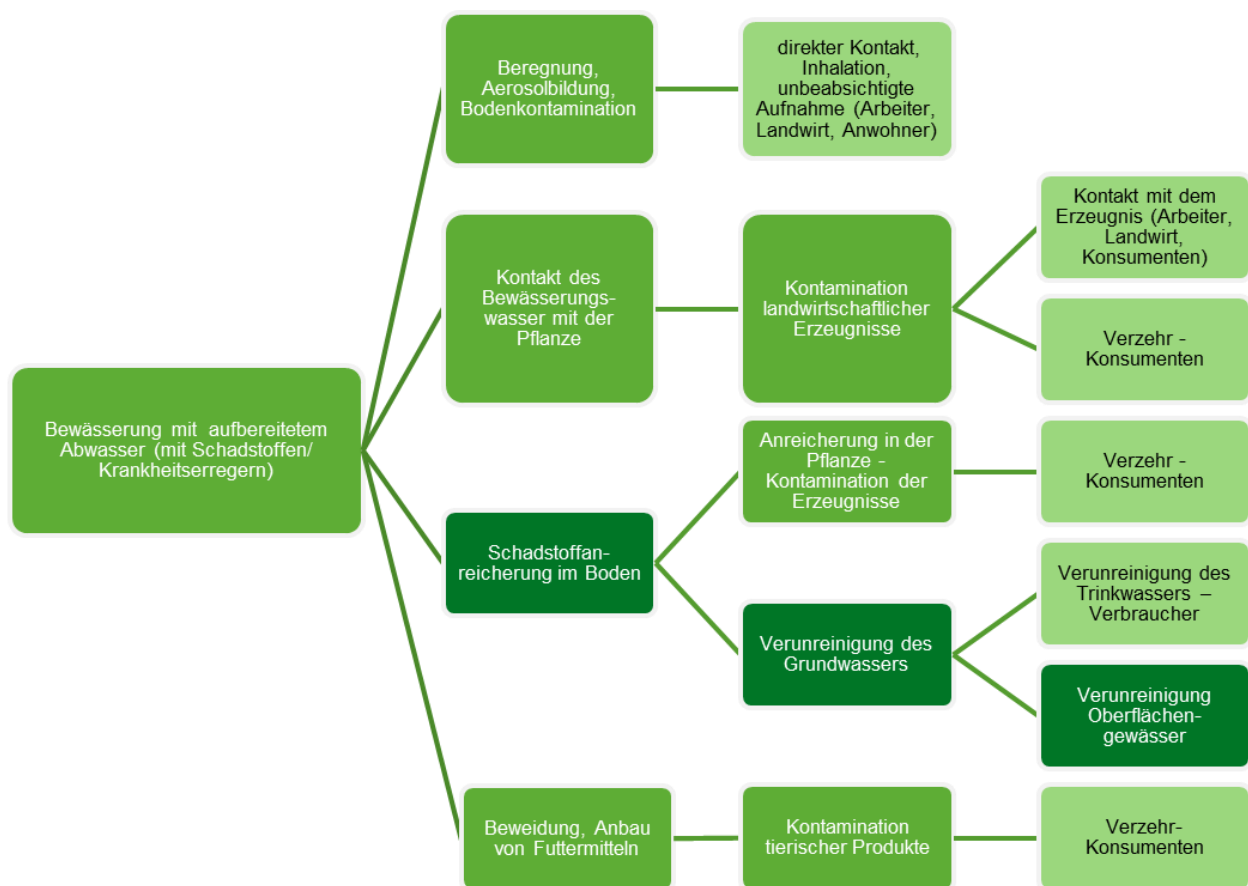
In Deutschland werden gegenwärtig nur 13 Prozent des verfügbaren Wasserdargebots genutzt. Davon werden nur 1,5 Prozent für die Bewässerung eingesetzt. Eine Analyse des gegenwärtigen und zukünftigen Bewässerungsbedarfs kommt zu dem Ergebnis, dass in Deutschland kein flächendeckender Bedarf für die Nutzung von behandeltem Abwasser besteht (Seis et al., 2016). In Ländern mit ausreichendem Wasserbedarf können die Risiken, Kosten und der Aufwand für die nötige Infrastruktur und Regelungen den Nutzen übersteigen. Grundsätzlich gebührt Wassereffizienzmaßnahmen der Vorrang zur Verhinderung von Wasserknappheit.

4.3 Risiken durch Wasserwiederverwendung

Ungeachtet der möglichen Vorteile ergeben sich durch die Nutzung von behandeltem Abwasser Risiken für die Umwelt und die menschliche Gesundheit. Schadstoffe und Krankheitserreger, die bei der Abwasseraufbereitung nicht oder unvollständig entfernt werden, werden bei der Bewäs-

serung und Grundwasseranreicherung flächenhaft in die Umwelt ausgebracht. Dies kann zu Verunreinigungen des Bodens, des Grundwassers sowie der Oberflächengewässer führen. Durch den Kontakt mit dem Wasser, dem bewässerten Boden oder den bewässerten Produkten sowie durch eine mögliche Beeinträchtigung des Trinkwassers sind potenziell das Betriebspersonal, Landwirte, Anwohner, die Öffentlichkeit, Verbraucherinnen und Verbraucher sowie Nutztiere betroffen (Abbildung 4-1). Zu den relevanten abwasserbürtigen Schadstoffen gehören Metalle, Nährstoffe, Salze und ihre Ionen, organische Stoffe (Mikroverunreinigungen), entstehende Metabolite/Transformationsprodukte sowie Krankheitserreger (Viren, Parasiten, Bakterien), die sich im Abwasser befinden können. Die resultierenden Risiken unterscheiden sich entsprechend dem Aufbereitungsniveau, der Art der Bewässerung (u. a. der Kontakt des Wassers mit der Pflanze, Menge und Dauer der Bewässerung) und der Herkunft und Zusammensetzung des Abwassers. Auch Bodeneigenschaften und klimatische Bedingungen haben Einfluss auf die möglichen Auswirkungen, z. B. die Schadstoffverlagerung.

Abbildung 4-1: Mögliche Expositionspfade für Mensch und Umwelt bei landwirtschaftlicher Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser



Quelle: Seis et al. (2016), verändert.

Beispielhaft seien Mikroverunreinigungen, wie zum Beispiel Arzneimittelrückstände, genannt. Konventionelle Kläranlagen sind nicht für deren Eliminierung optimiert. Entsprechend der Stoff-

eigenschaften unterscheidet sich die Eliminationsleistung in der Kläranlage deutlich. So werden zum Beispiel Diclofenac zu 50-75 %, Ibuprofen zu 60-95 % aber Iomeprol nur zu 10-30 % in Kläranlagen entfernt (Hillenbrand et al., 2014). Im Ablauf können sich in Folge dessen Rückstände von wenigen bis mehreren Mikrogramm pro Liter des jeweiligen Arzneimittels finden. Bekannt ist, dass Mikroverunreinigungen schon in diesen geringen Konzentrationen negative Auswirkungen für die aquatische Umwelt hervorrufen können (Triebskorn, 2017). Über die Auswirkungen auf Bodenorganismen ist bisher noch weniger bekannt.

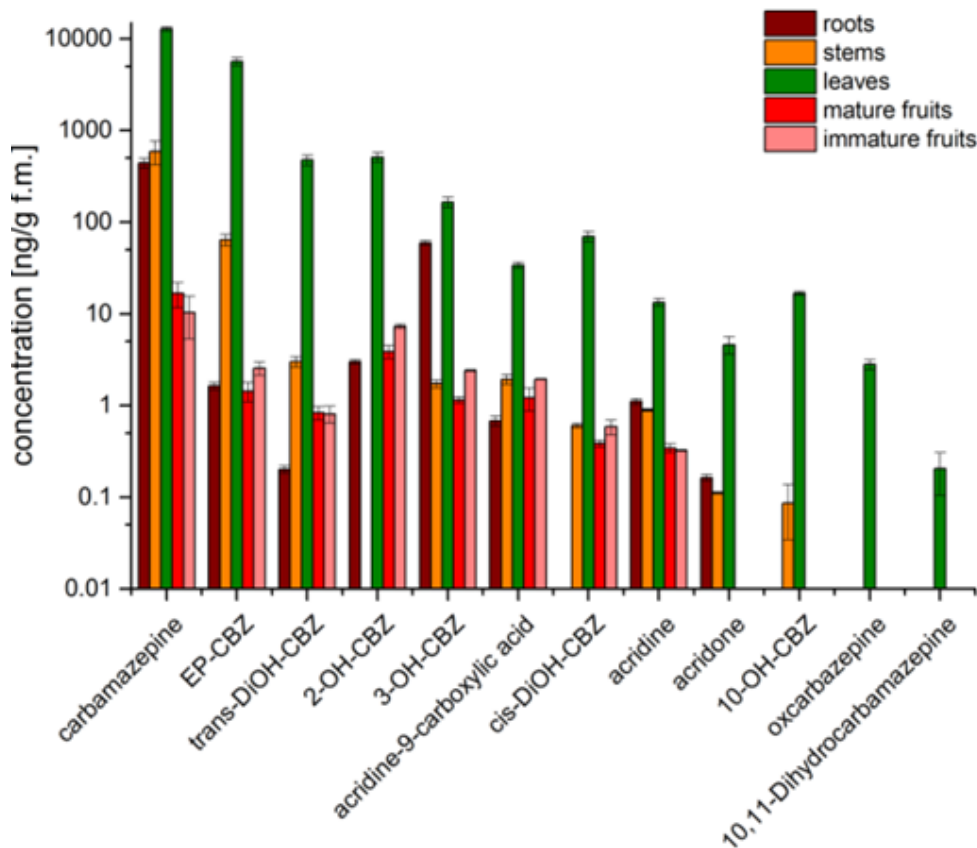
Durch die Verwendung von behandeltem Abwasser können Stoffe über die Bodenpassage in das Grundwasser gelangen und dort auch eine potentielle Gefährdung für das Trinkwasser darstellen (z. B. Heberer, Adam, 2004; Christou et al., 2017). Besonders besorgniserregend sind Substanzen, die persistent, bioakkumulierend und toxisch (PBT) oder persistent, mobil und toxisch sind, ebenso wie solche, die sehr persistent und sehr bioakkumulierend oder endokrin wirksam sind. Zu den problematischen Stoffen zählen auch *per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)*, die eine hohe Mobilität in Grund- und Oberflächenwässern, Persistenz und erschwerten Abbau in Böden aufweisen. Untersuchungen bestätigen eine Bioakkumulation von per- und polyfluorierten Chemikalien in Pflanzen (Blaine et al., 2014) infolge der Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser.

Ebenso liefern verschiedene Studien zur Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser den Nachweis, dass Arzneimittelrückstände, zum Beispiel Carbamazepin, während der Bodenpassage nicht absorbiert oder abgebaut werden und somit das Grundwasser erreichen können (POSEIDON, 2004; Ternes et al., 2007; Avisar et al., 2009). Bei Untersuchungen an den Standorten Braunschweig und Wolfsburg wurden im Grundwasser Überschreitungen von einzelstoffspezifischen gesundheitlichen Orientierungswerten (GOW) (v. a. Antiepileptika und Röntgenkontrastmittel) festgestellt (NLWKN, 2014 und 2017).

Auch eine Anreicherung von Arzneimitteln in Pflanzen ist durch verschiedene internationale Studien belegt (Shenker et al., 2011; Riemenschneider et al., 2017; Carter et al., 2014) (Abbildung 4-2). Ein Gesundheitsrisiko durch den Verzehr der Pflanzen mit entsprechenden Rückständen wurde in diesen Untersuchungen bisher nicht erkannt, da die festgestellten Mengen jeweils deutlich unter der medizinisch wirksamen Dosis lagen. Allerdings ist für eine Risikobewertung auch die Berücksichtigung von Kumulation und Mischung verschiedener Rückstände und die toxikologische Relevanz von Metaboliten nötig (Shenker et al., 2011; Riemenschneider et al., 2017; Webb et al., 2003).

Zudem besteht die Sorge, dass es durch die Verwendung von aufbereitetem Abwasser zu einer wachsenden Verbreitung von antibiotikaresistenten Bakterien und Resistenzgenen kommt. Ein entsprechendes Monitoring wäre daher ratsam. Gegenwärtig bestehen noch Unsicherheiten bezüglich des Verbleibs, dem Verhalten und möglichen Auswirkungen der Antibiotika und antibiotikaresistenten Bakterien (Christou et al., 2017).

Abbildung 4-2: Carbamazepin-Konzentration (ng/g Frischmasse) und dessen Transformationsprodukte in Pflanzenteilen der Tomate unter hydroponischen Bedingungen



Quelle: Riemenschneider et al. (2017).

Trotz einer Abwasseraufbereitung können sich auch Bakterien, Viren und Parasiten im behandelten Abwasser befinden. Das größte Risiko für die menschliche Gesundheit geht von Pathogenen aus, die für eine lange Zeit überleben und schon in kleinen Dosen Krankheiten auslösen können. Dies ist bei einigen Parasiten (z. B. *Giardia*, *Cryptosporidium*) und Viren (z. B. Rota-, Norovirus) der Fall. Insbesondere Viren stellen auch bei der Grundwasseranreicherung eine bedeutende Gefährdung für die menschliche Gesundheit dar. Die Entfernung von Viren in der Bodenpassage ist aufgrund ihrer geringen Größe stark von den Standortfaktoren abhängig. *Escherichia coli* ist ein gängiger mikrobieller Parameter für die Bewertung der Wasserqualität. Allerdings eignet sich *E. coli* aufgrund der geringen Persistenz (vor allem bei Desinfektionsmaßnahmen) und der vergleichsweise geringen Überlebensfähigkeit im Boden und in Gemüse nicht als Indikator für die sichere Wasserwiederverwendung. Zur Gewährleistung des Gesundheitsschutzes ist auch ein Monitoring oder zumindest eine Risikoabschätzung für Viren und Protozoen nötig. Wenn Desinfektion oder Filtration bei der Wasseraufbereitung zum Einsatz kommen, bedarf es einer Berücksichtigung von Indikatoren für Protozoen (z. B. *Clostridium perfringens*) beziehungsweise Viren (z. B. somatische

Coliphagen oder F-spezifische Phagen) in Ergänzung zu *E. coli*, um die Aufbereitungsleistung zu bewerten.

Mit einer in Deutschland üblichen Abwasseraufbereitung (3. Reinigungsstufe) werden Krankheitserreger und Mikroverunreinigungen nicht ausreichend entfernt. Das so aufbereitete Abwasser würde die Hygieneanforderungen für die Bewässerung von Lebensmitteln entsprechend der DIN 19650 nicht einhalten (Seis et al., 2016).

Bedarf eines systematischen und umfassenden Risikomanagementsystems

Die Minimierung der zuvor exemplarisch genannten Risiken erfordert ein systematisches Risikomanagement, in dem mögliche Gefahren des geplanten Wasserwiederverwendungsvorhabens analysiert und effiziente Maßnahmen zur Risikominimierung identifiziert werden. Eine mögliche Herangehensweise beschreibt das Handbuch für „*Sanitation safety planning*“ der Weltgesundheitsorganisation (WHO, 2016). Mit diesem Ansatz können die potenziellen Gefahren in dem System analysiert, die Risiken eingeschätzt und Maßnahmen für deren Beherrschung identifiziert und Monitoringkriterien abgeleitet werden. Ein umfassendes Risikomanagement ist auch wesentlicher Bestandteil der australischen Richtlinien für die Nutzung von aufbereitetem Abwasser (NHMRC, 2006).

4.4 Fazit und Empfehlungen

Die Verwendung von behandeltem Abwasser für die Bewässerung kann in ariden Regionen eine sinnvolle Möglichkeit sein, um knappe Frischwasserressourcen zu schonen. Gesundheits- und Umweltrisiken, die sich durch abwasserbürtige Krankheitserreger und Schadstoffe ergeben können, erfordern anspruchsvolle Anforderungen an die Wasserqualität. Zudem bedarf es eines umfassenden Risikomanagements und einer effizienten und zuverlässigen Risikominimierung durch multiple Barrieren an verschiedenen Ansatzpunkten in dem Gesamtsystem. Dieses schließt das Einzugsgebiet, die Wasseraufbereitung, die Wasserspeicherung und -verteilung sowie die landwirtschaftliche Praxis mit ein.

Neben dem Schutz vor Krankheitserregern bei der Ausbringung, Bewirtschaftung, Ernte und dem Verzehr, sollten vor allem der Boden- und Grundwasserschutz adäquate Berücksichtigung finden. Böden haben eine bedeutende Funktion für den Rückhalt und Abbau von Schadstoffen und somit für den Grundwasserschutz. Diese Funktionen müssen erhalten werden, um den Durchbruch von Schadstoffen in das Grundwasser, die Anreicherung in Pflanzen sowie Risiken für die Bodenökologie zu vermeiden.

Eine weitergehende Abwasserbehandlung ist nötig, um die abwasserbürtigen Schadstoffe und Krankheitserreger zu minimieren. Die in Deutschland übliche Abwasseraufbereitung (3. Reinigungsstufe) ist nicht für die Elimination von organischen Schadstoffen und Krankheitserregern optimiert. Unabhängig von einer weiteren Nutzung des behandelten Abwassers bestehen daher

Empfehlungen, Kläranlagen, unter anderem solche, die in Gewässer mit sensiblen Nutzungen – wie Badegewässer oder Trinkwasserressourcen – einleiten, mit einer weitergehenden 4. Reinigungsstufe nachzurüsten (UBA, 2015).

Die gegenwärtig auf EU-Ebene auf Grundlage des JRC-Berichts diskutierten Mindestanforderungen werden in ihrer aktuellen Entwurfsfassung dem Anspruch einer verbindlichen EU-Verordnung nicht gerecht. Mit Blick auf bestehende EU-Regelungen, den regional unterschiedlichen Bedarf für die Nutzung von behandeltem Abwasser innerhalb der EU und die verbleibenden Umwelt- und Gesundheitsrisiken ergibt sich die Frage nach dem Mehrwert einer verbindlichen EU-Regelung. Zielführender erscheint aus Sicht des Umweltbundesamts eine Leitlinie (Guidance), die in Ergänzung zu den bestehenden EU-Regelungen ein harmonisiertes Risikomanagementsystem etabliert, das dem Vorsorgeprinzip folgt und Risikominimierungsmaßnahmen im Gesamtsystem adressiert, um eine für Umwelt und Gesundheit sicherere Wasserwiederverwendung zu gewährleisten.

Literatur

- Avisar et al. (2009) Sulfamethoxazole contamination of a deep phreatic aquifer, *Sci. Total Environ*, 407 (14): 4278-4282, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.03.032
- BIO by Deloitte (2015) Optimising water reuse in the EU – Final report prepared for the European Commission (DG ENV), <http://ec.europa.eu/environment/consultations/pdf/Water%20Reuse.pdf> (Zugriff am: 28.08.2017)
- Bixio D, Wintgens T (Hrsg.) (2006) Water Reuse System Management Manual: AQUAREC, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg
- Blaine AC, Rich CD, Sedlacko EM et al (2014) Perfluoroalkyl Acid Uptake in Lettuce (*Lactuca sativa*) and Strawberry (*Fragaria ananassa*) Irrigated with Reclaimed Water, *Environ. Sci. Technol.* 48 (24): 14361-14368, DOI: 10.1021/es504150h
- Carter L J, Harris E, Williams M et al. (2014) Fate and Uptake of Pharmaceuticals in Soil–Plant Systems, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62 (4): 816-825, DOI:10.1021/jf404282y
- Christou A, Agüera A, Bayona J M, Cytryn E et al. (2017) The potential implications of reclaimed wastewater reuse for irrigation on the agricultural environment: The knowns and unknowns of the fate of antibiotics and antibiotic resistant bacteria and resistance genes – A review. *Water Res.* 2017 Oct 15;123:448-467, doi: 10.1016/j.watres.2017.07.004, Epub 2017 Jul 3
- EFSA – Europäische Lebensmittelbehörde (2017) Request for scientific and technical assistance on proposed EU minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge, Technical report, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/sp.efsa.2017.EN-1247/epdf> (Zugriff am: 24.08.2017)
- Heberer T, Adam M (2004) Transport and attenuation of pharmaceutical residues during artificial groundwater replenishment, *Environ. Chem.* 1: 22-5

- JRC – Joint Research Center (Hrsg.) (2017) Development of minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge, <https://circabc.europa.eu/d/a/workspace/SpacesStore/29cd709e-c696-4914-92de-ff81c5a12d80/JRC%20%20min%20qual%20req%20v%203%203%20%2012th%20JUNE%202017.docx> (Zugriff: 24.08.2017)
- JRC – Joint Research Center (Hrsg.) (2014) Water Reuse in Europe. Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation, DOI: 10.2788/29234
- Lazarova V, Asano T, Bahri A et al. (Hrsg.) (2013) Milestones in Water Reuse: The Best Success Stories, IWA publishing, London
- NHMRC – National Health and Medical Research Council (2006) Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 1), NWQMS – National water quality management strategy 21
- NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2017) Regionaler Themenbericht, Rückstände von Arznei- und Röntgenkontrastmitteln im Grundwasser, Untersuchung in Abwasser- bzw. Klärschlammverregnungsgebieten im Raum Braunschweig-Wolfsburg, Grundwasser Band 20
- NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2017) Regionaler Themenbericht, Rückstände von Arznei- und Röntgenkontrastmitteln im Grund- und Oberflächenwasser, Wiederholende und ergänzende Untersuchung in Abwasser- bzw. Klärschlammverregnungsgebieten im Raum Braunschweig-Wolfsburg, Grundwasser Band 30
- POSEIDON (2004) Assessment of Technologies for the Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Sewage and Drinking Water Facilities to Improve the Indirect Potable Water Reuse, Detailed Report related to the overall duration, Project coordinator: Dr. Thomas Ternes. http://undine.bafg.de/servlet/is/2888/Final-Report-POSEIDON-Feb_20051e77.pdf?command=downloadContent&filename=Final-Report-POSEIDON-Feb_2005.pdf (Zugriff am: 28.08.2017)
- Riemenschneider C, Seiwert B, Moeder M et al. (2017) Extensive Transformation of the Pharmaceutical Carbamazepine Following Uptake into Intact Tomato Plants. *Environmental Science & Technology*, 51 (11): 6100-6109. DOI: 10.1021/acs.est.6b06485
- SCHEER – Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (2017) Scientific advice on proposed EU minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge, https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/scheer/docs/scheer_o_010.pdf (Zugriff am: 24.08.2017)
- Seis W, Lesjean B, Maaßen S et al. (2016) Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung, UBA-Texte 34/2016, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rahmenbedingungen-fuer-die-umweltgerechte-nutzung> (Zugriff am: 27.08.2017)
- Shenker M, Harush D, Ben-Ari J et al. (2011) Uptake of carbamazepine by cucumber plants – A case study related to irrigation with reclaimed wastewater, *Chemosphere*. 82 (6): 905-910. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.10.052>
- SIWI – Stockholm International Water Institute (2017) World Water Week 2017, <http://www.worldwaterweek.org/> (Zugriff am: 28.08.2017)

- Tal A (2013) Management of transboundary wastewater discharges: Wastewater management in urban communities along the Israeli-Palestinian "border", In: Megdal S B, Varady R G, Eden S (Hrsg.): Shared Borders, Shared Waters: 221-231
- Ternes T A, Bonerz M, Herrmann N et al. (2007) Irrigation of treated wastewater in Braunschweig, Germany: An option to remove pharmaceuticals and musk fragrances, Chemosphere, 2007 Jan;66(5):894-904, Epub 2006 Jul 26. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.06.035
- Triebskorn R (Hrsg.)(2017) Weitergehende Abwasserreinigung – Ein wirksames und bezahlbares Instrument zur Verminderung von Spurenstoffen und Keimen im Wasserkreislauf, <http://dx.doi.org/10.15496/publikation-15721>
- UBA – Umweltbundesamt (2015) Positionspapier März 2015, Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern – Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/organische_mikroverunreinigungen_in_gewassern_vierte_reinigungsstufe_0.pdf (Zugriff am: 28.08.2017)
- UBA – Umweltbundesamt (2017) Empfehlungen des Umweltbundesamtes für die Entwicklung von EU-Mindestqualitätsanforderungen für Wasserwiederverwendung. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/water-reuse_positionspapier_uba_de.pdf (Zugriff am: 28.08.2017)
- UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2017) The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The untapped resource. Paris. https://www.unesco.de/fileadmin/medien/Dokumente/Wissenschaft/WWDR_2017_Full.pdf. Informationen in Deutsch: <https://www.unesco.de/wissenschaft/2017/weltwasserbericht-2017.html> (Zugriff jeweils am: 23.08.2017)
- US EPA – United States Environmental Protection Agency (2012) Guidelines for Water Reuse 2012. Report EPA/600/R-12/618. Washington DC
- van Houtte E, Cauwenberghs J, Weemaes M et al (2012) Indirect potable reuse via managed aquifer recharge in the Torreele/St. André project. In: Kazner C, Wintgens T, Dillon P (eds.): Water Reclamation Technologies for Safe Managed Aquifer Recharge. IWA Publishing. London
- Webb S, Ternes T, Gibert M et al. (2003) Indirect human exposure to pharmaceuticals via drinking water. Toxicology Letters. 142 (3): 157-67
- WHO – World Health Organization (2017) Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water. Geneva. <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/258715/1/9789241512770-eng.pdf?ua=1> (Zugriff am: 23.08.2017)

5 Erfahrungen aus der Abwassernutzung auf landwirtschaftlichen Flächen

Bernhard Teiser

Abwasserverband Braunschweig

5.1 Einleitung

Obwohl Deutschland ein wasserreiches Land ist, herrscht zu Zeiten mit längerer Trockenheit in bestimmten Bereichen immer wieder Wassermangel. Schon vor Jahrzehnten hat die Wasserwirtschaft Lösungen gefunden, z. B. indem sie das Wasser aus Überschussgebieten über Fernwasserleitungen in die Bedarfsgebiete leitet. Beispielsweise ist die Versorgung von Städten und Gemeinden in Norddeutschland durch Wasser aus den Harztalsperren zu nennen.

Für die Bereitstellung von Wasser für die Bewässerung großer Flächen mit Pflanzenanbau gelten andere Voraussetzungen. Die Notwendigkeit der Bewässerung ist aus klimatischen Gründen von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich und immer nur für eine bestimmte Zeit des Pflanzenwachstums erforderlich. Die jährliche klimatische Wasserbilanz in Deutschland ist grundsätzlich positiv, die Niederschläge sind höher als die Verdunstung. Leider ist diese Feststellung nicht überall für die Vegetationszeit der Pflanzen zutreffend. Die Wetteraufzeichnungen zeigen, dass die Zeiten mit einer negativen Wasserbilanz in Nordost-Niedersachsen, dem größten Beregnungsgebiet Deutschlands, seit Jahrzehnten zunehmen. In dem beschriebenen Gebiet, dazu gehört auch die Lüneburger Heide, wird auf den leichten Böden mit Bodenzahlen zwischen 18 und 35 eine intensive Landwirtschaft betrieben. Die ausbleibenden Niederschläge werden hier durch Beregnung ausgeglichen.

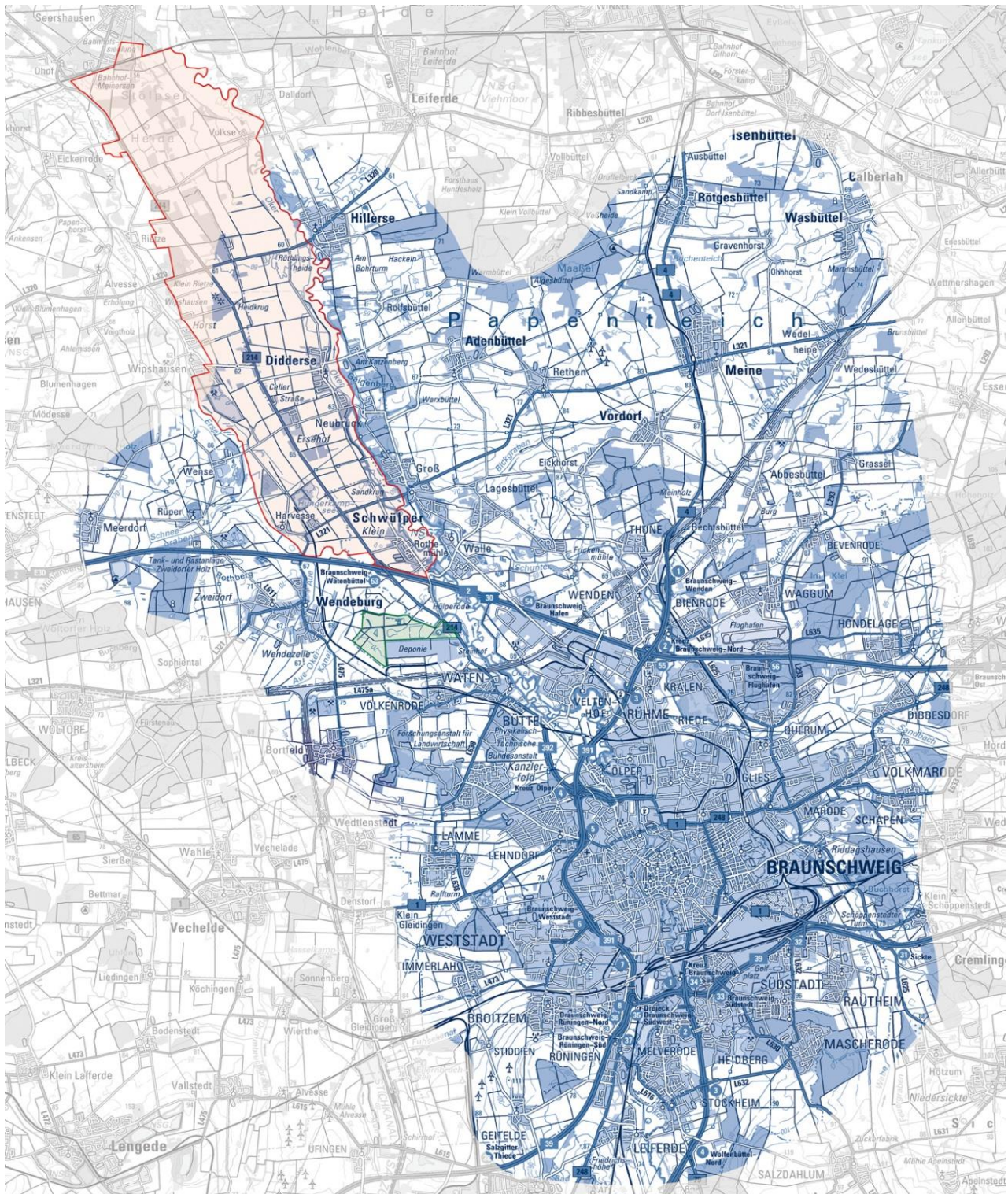
In Niedersachsen ist die Entnahme von Wasser aus der „fließenden Welle“, aus Flüssen und Seen, nicht zugelassen. Damit bleibt nur die Entnahme aus dem Grundwasser, die gesetzlich begrenzt ist um sicherzustellen, dass durch zu starke Absenkung des Grundwasserspiegels die Vorfluter nicht trocken fallen und die Ökologie in Feuchtgebieten nicht beeinträchtigt wird.

Die Begrenzung erfolgt durch wasserrechtliche Erlaubnisbescheide, die im siebenjährigen Durchschnitt Entnahmemengen von 80 mm je Hektar und Jahr zulassen. Mit derart begrenzten Wassermengen wäre unter den gegebenen Verhältnissen eine ausreichende Bewässerung der Felder des Abwasserverbandes Braunschweig nicht möglich. Der Bedarf konnte hier nur durch die Nutzung des Abwassers der Stadt Braunschweig gedeckt werden. In Braunschweig hat die landwirtschaftliche Abwasserverwertung eine über hundertjährige Tradition.

Die bis heute genutzten Rieselfelder wurden 1895 in Betrieb genommen. Sie wurden bis 1962 landwirtschaftlich für den Gemüseanbau genutzt und sind danach zur biologischen Nachreinigung des Kläranlagenablaufs umgestaltet worden. Sie bilden gleichzeitig ein Rast- und Brutgebiet für viele Vogelarten. Die Rieselfelder wurden nur für 100.000 Einwohner angelegt und waren schon vor dem 2. Weltkrieg zu klein. Anstelle einer Erweiterung oder eines Kläranlagenbaus wurde eine Abwasserverregnung geplant. Dafür wurde im Jahre 1954 der Abwasserverband Braunschweig als

Wasser- und Bodenverband gegründet. Auf einer Fläche von 4.000 Hektar wurden in vier Bauabschnitten die vier Pumpwerksbezirke mit 2.700 Hektar Beregnungsfläche ausgebaut. Im Zuge des Ausbaues wurden 100 Kilometer Erdleitungen mit 900 Unterflurhydranten verlegt, aus denen das Wasser für die Regenmaschinen entnommen wird (Abbildung 5-1).

Abbildung 5-1: Karte Verbandsgebiet des Abwasserverbands Braunschweig



■ Verrechnungsgebiet/Verbandsgebiet ■ Rieselfelder ■ Einzugsgebiet

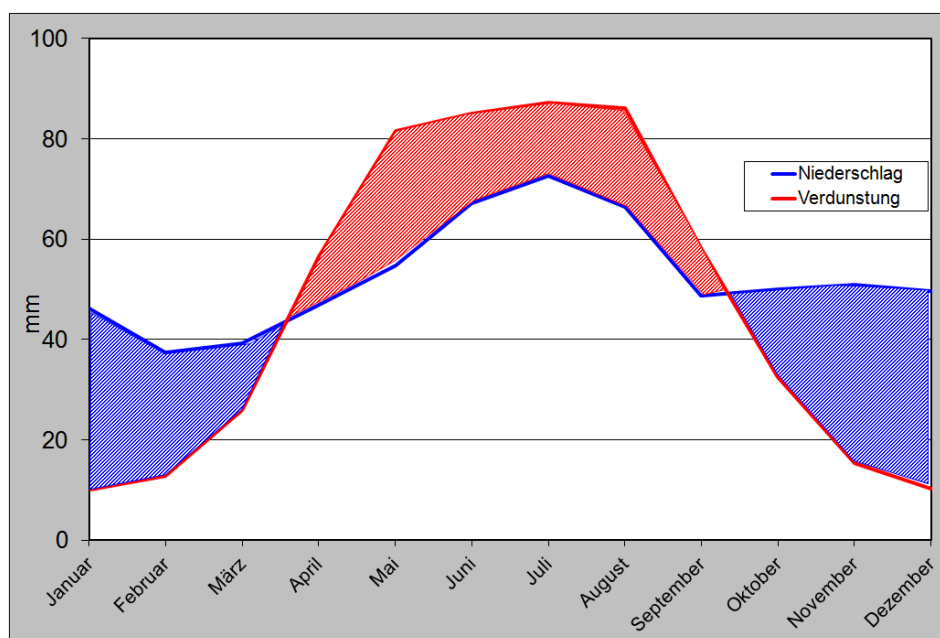
Quelle: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen/Steffen & Bach GmbH.

5.2 Voraussetzungen der landwirtschaftlichen Abwasserverwertung

Abwasserverwertung kann ganzjährig nur dort stattfinden, wo die entsprechenden Voraussetzungen gegeben sind. In Deutschland besteht die Beregnungsbedürftigkeit aufgrund des Klimas und der Bodengüte nur in bestimmten Gebieten. Damit ist auch der wichtigste Grund genannt, weshalb die landwirtschaftliche Abwasserverwertung nicht stärker in Deutschland verbreitet ist und größere Anlagen, neben denen in Braunschweig und Wolfsburg, nicht mehr entstanden sind.

Die Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes, Station Braunschweig, zeigen, dass in den Monaten April bis September die klimatische Wasserbilanz negativ ist (Abbildung 5-2). Das Defizit zur Zeit der Gründung des Verbandes betrug 122 mm. In den letzten zehn Jahren ist die durchschnittliche Fehlmenge während der Vegetationszeit auf 181 mm angestiegen. Der Rückgang der Niederschläge im Frühjahr und Sommer wird weitgehend durch höhere Winterniederschläge ausgeglichen, was möglicherweise auf die zu beobachtende Steigerung der durchschnittlichen Jahrestemperaturen zurückzuführen ist.

Abbildung 5-2: Mittlere klimatische Wasserbilanz von 1921 bis 2011



Quelle: Abwasserverband Braunschweig (2012).

Eine ganzjährige Abwasseraufbringung setzt leichte Böden in ebener Lage voraus. Die leichten Böden können auch nach Niederschlägen zusätzlich Wasser aufnehmen. Die ebene Lage ist erforderlich, damit das Wasser sich gleichmäßig auf der Fläche verteilt und nicht ab- oder zusammenfließt. Auch diese zweitwichtigste Voraussetzung ist in Braunschweig gegeben.

Zudem sollten Grundwasserstände von etwa 1,50 Meter unter der Oberfläche ggf. durch entsprechend tief verlegte Dränungen geschaffen werden. Auch ist eine möglichst geringe Besied-

lungsdichte wünschenswert, weil die notwendigen Auflagen in der „Wasserrechtlichen Erlaubnis“ durch die Wasserbehörde – besonders im Hinblick auf einzuhaltende Sicherheitsabstände usw. auch an öffentlichen Verkehrswegen – zu wirtschaftlich nicht zu vertretbaren Einschränkungen führen können. Die Akzeptanz durch die Anwohner muss in diesem Zusammenhang ebenfalls gesehen werden. Sie ist nur durch die Ausschaltung von Geruchsbelästigungen anhand geeigneter Maßnahmen zu erreichen.

Letztlich müssen optimal gestaltete Schlaggrößen und -formen den Einsatz moderner Beregnungsgeräte und -maschinen und damit den wirtschaftlichen Beregnungsbetrieb zulassen. In Braunschweig wurde diese Voraussetzung durch die Schaffung eines Wege- und Gewässernetzes und das damit identische Erdleitungsnetz mit den Entnahmehydranten im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren geschaffen.

5.3 Vorteile der landwirtschaftlichen Abwasserverwertung

In den Beratungen vor der Verbandsgründung spielten natürlich die Vorteile aus der jeweiligen Sicht der Beteiligten die entscheidende Rolle. Die Stadt Braunschweig brauchte damals keine Kläranlage zu bauen und zu betreiben.

Der inzwischen durchgeführte Kläranlagenbau verringert zwar den Vorteil des Abwasserlieferanten gegenüber früher (Rohabwasserverregnung), jedoch ist durch einen angepassten Kläranlagenausbau (geringere Nachklärbeckenkapazitäten, keine Filtration etc.) ein Vorteil der Abwasserverregnung gegenüber dem herkömmlichen Kläranlagenbetrieb vorhanden. Auch die Mitverregnung des jetzt ausgefaulten Schlammes ist als Vorteil sowohl für den Abwasserlieferanten (geringere Entsorgungskosten) als auch für den Landwirt (Pflanzennährstoffe) zu sehen.

Für die Landwirtschaft spielte die Nutzung der Inhaltsstoffe, der Dünge- und organischen Stoffe, vor allem aber die Wasserbereitstellung, die wichtigste Rolle. Die leichten Sandböden werden durch die organischen Bestandteile aufgewertet, ihre wasserhaltende Kraft wird verbessert, Nährstoffe werden zugeführt und die im Durchschnitt der Jahre in der Vegetationszeit fehlenden Niederschläge werden durch die Beregnung ersetzt und die klimatische Wasserbilanz ausgeglichen.

Die jährlich mit dem Abwasser aufgebrauchten Nährstoffmengen liegen bei

- 67 kg/ha mineralischen Stickstoff,
- 80 kg/ha P_2O_5 ,
- 90 kg/ha K_2O ,
- sowie Schwefel und Kalk in nennenswerten Mengen.

Insbesondere die Phosphordüngung wird fast vollständig aus dem Abwasser/Klärschlamm geliefert.

Die Bereitstellung des fehlenden Wassers brachte die gewünschten und erwarteten Ertragssteigerungen. Viel wichtiger ist aber die Möglichkeit, auch andere, anspruchsvollere Früchte (Zuckerrüben, Mais, Weizen) anzubauen. Dabei ist die Ertragssicherung durch die Beregnung als besonders hoch einzuschätzen, hängt doch damit, aus betriebswirtschaftlicher Sicht, die Liquidität und der langfristige Bestand der Betriebe zusammen. Zu erwähnen ist an dieser Stelle auch, dass der heute in vielen Bereichen durchgeführte Vertragsanbau und die damit verbundene Verpflichtung zur Vertragserfüllung ohne Beregnung auf den leichten Böden nicht möglich wären.

Ein Vorteil aus heutiger Sicht ist unter den Stichworten Ökologie – Umweltschutz – Kreislaufwirtschaft zu sehen. Hier muss genannt werden:

- Die Vermeidung der Restverschmutzung des Vorfluters. Immerhin konnte zwischenzeitlich die Güteklasse II (mäßig belastet) im Unterlauf der Oker nördlich von Braunschweig erreicht werden.
- Die Bereitstellung von Beregnungswasser durch Abwasser anstelle von Grundwasser. Um für die Verbandsfläche das durchschnittlich benötigte Beregnungswasser bereitzustellen, müssten 4-5 Mio. m^3 Grundwasser jährlich gefördert werden.
- Die erwähnte Doppelnutzung des Wassers sowie die Nutzung der Inhaltsstoffe und des Klärschlammes im Sinne des heute maßgebenden Kreislaufwirtschaftsgesetzes.

Das im ersten Jahrzehnt nach Aufnahme des Verregnungsbetriebes genutzte Rohrberegnungsverfahren erforderte, vor allem in der Hauptberegnungszeit, sehr viele Arbeitskräfte. So wurden unter Beteiligung des Verbandes Trommelberegnungsmaschinen entwickelt. Diese Beregnungstechnik ist später in der Feldberegnung in der Bundesrepublik Deutschland die allgemein gebräuchliche Beregnungstechnik geworden.

Abbildung 5-3: Beregnungsmaschine

Quelle: Abwasserverband Braunschweig. (2017)

5.4 Herausforderungen

Ein Problem, das den Fortbestand der Abwasserverregnung in Frage gestellt hat, waren Geruchsbelästigungen durch das in den ersten 20 Jahren ausgebrachte Rohabwasser, das lediglich mechanisch gereinigt war. Die Einwohner der Orte im oder am Verregnungsgebiet waren nicht länger bereit, die Belästigungen hinzunehmen. Alle damals angestellten Untersuchungen und Versuche führten letztlich dazu, eine Vorbehandlungsanlage, d. h. eine Kläranlage mit biologischer Reinigungsstufe zu bauen, in der die leicht in Faulung übergehenden organischen Stoffe mineralisiert und abgebaut werden. Der Vorschlag wurde 1979 in die Tat umgesetzt und bildete den ersten von mehreren Bauabschnitten, mit denen das Klärwerk Steinhof ausgebaut wurde (Abbildung 5-4). Erfreulicherweise stellte sich der erwartete Erfolg ein.

Abbildung 5-4: Klärwerk Steinhof

Quelle: Dieter Heitefuß. (2017)

Die vertretbaren Werte des Bodens und des Klärschlammes nach Klärschlammverordnung konnten nicht darüber hinwegtäuschen, dass Handlungsbedarf bestand, wenn man die über längere Zeiträume zu befürchtende Akkumulation der Schadstoffe ausschließen wollte. Ab 1980 durchgeführte Einleiterkontrollen durch den Kanalnetzbetreiber führten zu einer Senkung z. B. der Cadmiumfracht von über 90 %. Die Novelle zum Wasserhaushaltsgesetz schaffte 1985 die Möglichkeit, Verstöße gegen die entsprechend geänderte Abwassersatzung der Stadt mit hohen Bußgeldern zu ahnden. Das Ergebnis war eine Unterschreitung der 1982 festgesetzten und der 1992 drastisch verschärften Grenzwerte der Klärschlammverordnung. Die in dem Maße nicht erwarteten Erfolge durch Einleiterkontrollen in etwa 500 Betrieben haben es mit sich gebracht, den Klärschlamm landwirtschaftlich zu verwerten.

Stickstoff, einer der wichtigsten Nährstoffe für das Pflanzenwachstum, ist im Abwasser enthalten. Die Durchlässigkeit der leichten Sandböden legt die Annahme nahe, dass das leicht lösliche Nitrat ausgewaschen wird und in das Grundwasser gelangt. Es wird weiter davon ausgegangen, dass dieser Prozess bei der Aufbringung von Abwasser noch verstärkt wird, weil sie ganzjährig und weitestgehend unabhängig von den natürlichen Witterungsbedingungen erfolgt. Aus den genannten Gründen wurden und werden ständig im Verregnungsgebiet entnommene Grund- und Drainagewasserproben von staatlichen Stellen untersucht. Sie zeigen, dass eine Beeinträchtigung in dem Maße, wie man annehmen könnte, nicht eintritt. Ohne dass dafür gesetzliche Vorschriften oder Auflagen gemacht wurden, sind vom Verband im Laufe der Jahre zahlreiche Maßnahmen getroffen worden, die einer Nitratverlagerung entgegenwirken.

Die wichtigsten sind in der vegetationsarmen Zeit:

- Die Eliminierung von mehr als 90 % des Stickstoffes durch Nitrifikation und Denitrifikation im Klärwerk.
- Die Verringerung der Abwasseraufbringungsmenge durch stärkere Nutzung der umgestalteten Rieselflächen bis hin zur Einstellung der Beregnung im Winter.
- Die Förderung des Anbaues von Winterzwischenfrüchten zur Gründüngung mit dem Ziel der Aufnahme und Festlegung des von den Pflanzen nicht genutzten Reststickstoffes.
- Die Beratung der Landwirte hinsichtlich der vorhandenen N-min-Werte.
- Die wöchentliche Unterrichtung der Landwirte über die mit dem Abwasser aufgebrauchten Nährstoffe. Dadurch kann vor allem der mineralisierte und damit von den Pflanzen aufnehmbare Stickstoff von den Landwirten bei der Düngung berücksichtigt werden.
- Die Aufstellung eines schlagbezogenen Flächenkatasters entsprechend den Vorschriften der Düngeverordnung.
- Die Unterrichtung der Landwirte über alle wichtigen Fragen und Probleme in den Jahresversammlungen vor Beginn der Frühjahrsarbeit.

Schließlich sind hier noch die schwer abbaubaren, organischen Schadstoffe zu nennen, die in den letzten Jahren zunehmend Beachtung gefunden haben. Die Klärschlammverordnung von 1992 schreibt deshalb Analysen zur Feststellung von halogenierten Kohlenwasserstoffen unter dem Summenparameter AOX und von Dioxinen und Furanen vor. Die Untersuchungsergebnisse in Braunschweig geben keinen Grund zu der Annahme, dass die festgesetzten Grenzwerte einmal erreicht oder gar überschritten werden könnten.

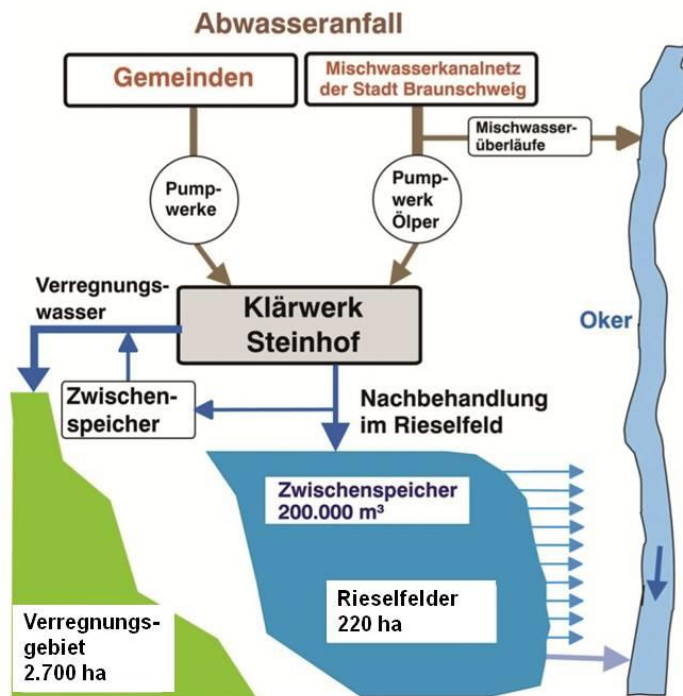
Auch die jetzt verstärkt untersuchten Mikroschadstoffe wie Arzneimittelreste, Duftstoffe und andere schwer abbaubare Schadstoffe werden durch die Bodenpassage eher eliminiert als durch das Einleiten in ein Gewässer. Das europäische Forschungsprojekt „Poseidon“ hat dies belegt.

5.5 Das Abwasserkonzept Braunschweig

Bereits vor Jahren wurde für Braunschweig und die angeschlossenen Gemeinden mit 350.000 Einwohnergleichwerten ein Konzept entwickelt, das vorsieht

- das gesamte Abwasser im Klärwerk Steinhof, etwa 20 Mio. m³/a, zu reinigen und der Verregnung auf den landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen bzw. der Nachbehandlung auf den Rieselflächen zuzuführen,
- kein gereinigtes Abwasser aus dem Klärwerk direkt in die Oker abzuleiten.

Dieses Konzept hat die erwähnte ständige Verbesserung der Wasserqualität der Oker bewirkt. Ein Ergebnis, das seinesgleichen in Niedersachsen und vielleicht darüber hinaus sucht (Abbildung 5-5).

Abbildung 5-5: Abwasserkonzept Braunschweig

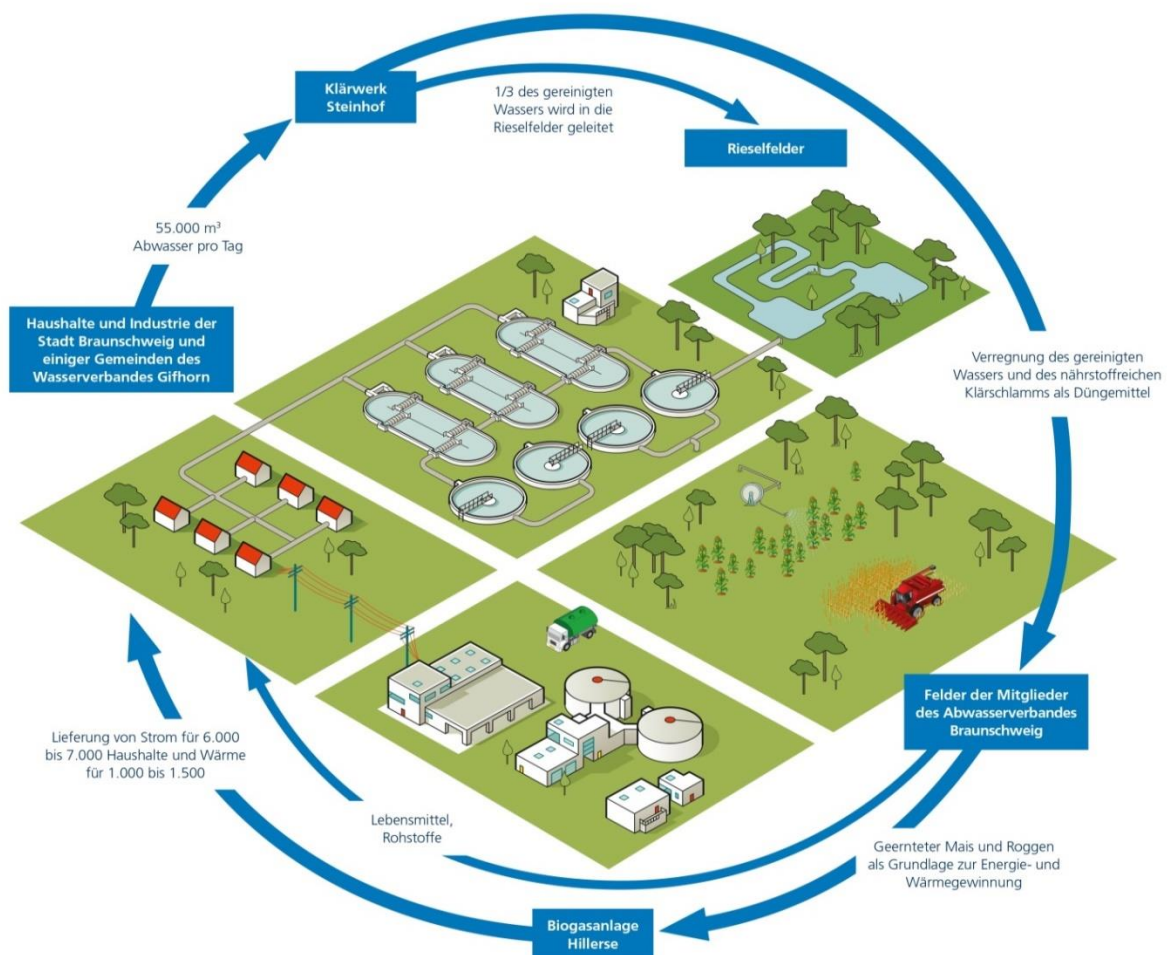
Quelle: Abwasserverband Braunschweig/Steffen und Bach GmbH (2017)

5.6 Nachwachsende Rohstoffe

Um den Landwirten die Möglichkeit zu geben, neben der Lebensmittelproduktion auf nachwachsende Rohstoffe ausweichen zu können, hat der Verband im Verregnungsgebiet eine Biogasanlage errichtet, die Biogas für 2,5 MWel erzeugt. 80 % des Biogases werden direkt über eine 20 km lange Leitung nach Braunschweig transportiert, dort verstromt und Strom und Wärme in die kommunalen Netze eingespeist. Diesen Wasser-Nährstoff und Energiekreislauf nennen wir „Das Braunschweiger Modell“ (Abbildung 5-6 und 5-7).

Abbildung 5-6: Biogasanlage Hillerse

Quelle: Abwasserverband Braunschweig (2017).

Abbildung 5-7: Der Wasser-Nährstoff- und Energiekreislauf im Braunschweiger Modell

Quelle: Abwasserverband Braunschweig/Steffen und Bach GmbH (2017).

5.7 Fazit und Ausblick

Die Abwasserlandbehandlung ist die älteste Art der Abwasserverwertung. Nur in wenigen Fällen wird diese naturnahe Methode genutzt und ausgebaut. Der Abwasserverband Braunschweig hat dieses System aufrechterhalten und ausgebaut. Dabei wurden viele Probleme gelöst und Widerstände überwunden. Gerade unter dem Aspekt der knapper werdenden Grundwasserressourcen für die Landwirtschaft, die endlichen Phosphatvorräte auf der Welt und die Reduzierung von Schadstoffen ist dieses System aktuell und zukunftsweisend. Der Verband wird alles daran setzen, die landwirtschaftliche Klärschlamm- und Abwasserverwertung auch morgen und in Zukunft weiter durchführen zu können!

6 Rechtliche Aspekte und Konflikte landwirtschaftlicher Wassernutzung

Dr. Sandra Kruse

Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen

6.1 Hintergrund

Die Bewässerung von landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Kulturen ist eine pflanzenbauliche Maßnahme zur Sicherung von Qualität und Quantität. Unter trockenen Bedingungen und auf leichten Standorten ist es oftmals die einzige Methode, die Etablierung, das Wachstum und die Ernte eines Pflanzenbestandes zu gewährleisten. Der erfolgreiche Anbau von sensiblen Sonderkulturen wie Gemüse und Kräutern, aber auch der großflächige Anbau von Mais, Kartoffeln und Wintergetreide kann durch die Möglichkeit der Bewässerung abgesichert werden. Bewässerung steht somit als Garant für die Sicherung von Qualität und Quantität regional erzeugter Lebensmittel. Neben der Landwirtschaft und der Industrie hat insbesondere die öffentliche Wasserversorgung Bedarf an qualitativ hochwertigem und in ausreichendem Maße zur Verfügung stehendem Trinkwasser. Nutzungskonkurrenzen und Nutzungskonflikte sind somit nicht selten, umfassende rechtliche Regelungen und Vorschriften für die Nutzung von Trinkwasser bzw. Grundwasser geben dabei Planungssicherheit.

6.2 Rechtliche Aspekte

Die landwirtschaftliche Wassernutzung wird von einer Vielzahl an Gesetzen, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften und Erlassen geregelt, wobei jedes Bundesland die detaillierte Ausgestaltung der Pläne und der Verwaltungsvorschriften vornimmt. Neben den Anforderungen an die Erteilung von Rechten und/oder Erlaubnissen zur Wasserentnahme zum Zwecke der Bewässerung werden dabei auch die Bedingungen und die Zeiträume der Benutzung festgesetzt. Nachfolgend sind die maßgeblichen, für wasserrechtliche Verfahren relevanten Gesetze, Verordnungen und Verwaltungsvorschriften für das Bundesland Hessen aufgeführt:

- Wasserrahmenrichtlinie – EG-WRRL (2000),
- Wasserhaushaltsgesetz – WHG (2016),
- Hessisches Wassergesetz – HWG (2015),
- Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried (1999),
- Landesentwicklungsplan Hessen (2000),
- Regionalplan Südhessen (2010),
- Bewirtschaftungsplan Hessen (2015-2021),
- Integrierter Klimaschutzplan Hessen (bis 2025).

Genehmigungen der Wassernutzung werden oftmals an Anforderungen gebunden. Normen, technische Regelwerke, Statistiken und Prognosen helfen dabei, die Auflagen zu erfüllen und einheitliche fachliche Bewertungsmaßstäbe anzusetzen.

Dies sind unter anderem:

Technische Regelwerke, Normen, Statistiken des/der

- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. – DVGW,
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. – DWA,
- Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e. V. – fbr,
- Deutsches Institut für Normung e. V. – DIN,
- Fachinformationssystem Grundwasser – FIS-GW (2015),
- Nicht-/Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Hessen (HSL 2015),
- Bevölkerungsvorausschätzung für Hessen und seine Regionen als Grundlage der Landesentwicklungsplanung (HA 2016),
- Situationsanalyse zur Wasserversorgung in der Rhein-Main-Region (WRM 2016),
- Leitfaden zur Durchführung von Untersuchungen im Rahmen von Wasserrechtsanträgen (ahu 2004).

Die Genehmigungspraxis unterscheidet sich dabei je nach Bundesland immens. Die Unterschiede liegen einerseits in den fachlichen Anforderungen, andererseits auch in den zeitlichen und organisatorischen Abläufen für eine Genehmigung. Aus diesem Grund ist eine einzelfallspezifische Betrachtung der regionalen Bedingungen und Anforderungen und ggf. die Einbeziehung von regional kundigen Beratungskräften vor der Antragsstellung auf jeden Fall angezeigt.

6.3 Grundsätze des rechtlichen Rahmens

Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Fokus der rechtlichen Rahmenbedingungen insbesondere auf dem Schutz und der Verbesserung der Qualität bei gleichzeitiger Wahrung der Quantität von Oberflächengewässern und Grundwasser liegt. Gleichzeitig wird vom Gesetzgeber gefordert und gefördert, dass die Wassernutzung effizient und nachhaltig auf der Grundlage eines langfristigen Schutzes vorhandener Ressourcen erfolgt (Wasserrahmenrichtlinie). Jede Person ist somit verpflichtet, die erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine mit Rücksicht auf den Wasserhaushalt gebotene sparsame Verwendung des Wassers sicherzustellen (Wasserhaushaltsgesetz), wobei die öffentliche Wasserversorgung Vorrang vor allen anderen Benutzungen des Grundwassers genießt.

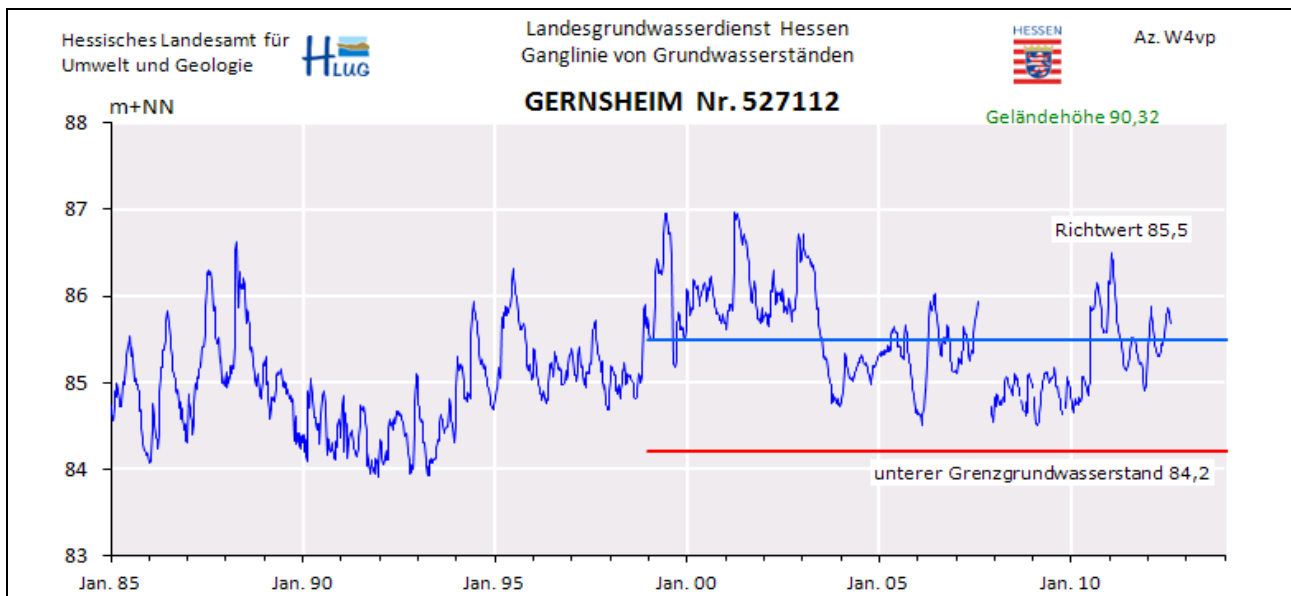
In Hessen gibt es neben den erwähnten Bundesgesetzen und dem hessischen Wassergesetz eine Vielzahl an Plänen, die die Wassernutzung bzw. die Sicherstellung der (Trink-)Wasserversorgung regeln. Neben Landes- und Regional-(Entwicklungs-)Plänen ist das in der bewässerungsintensiven Region Südhessen insbesondere der Grundwasser-Bewirtschaftungsplan Hessisches Ried. Auch hier werden die Grundsätze einer sparsamen Wasserverwendung aufgegriffen, wobei zudem explizit der landwirtschaftliche Wasserbedarf benannt wird. Dieser soll soweit möglich mit Grundwasser gedeckt werden, der weitere Zusatzwasserbedarf wird über die teilortsfesten Beregnungsanlagen gedeckt. Die Beregnungsanlagen sollen möglichst weiträumig ausgebaut, vernetzt und mit aufbereitetem Rheinwasser gespeist werden. Hier zeigt sich eine Besonderheit des hessischen Rieds.

6.4 Hessisches Ried – Beregnungsregion Südhessen

Im Rheinwasserwerk Biebesheim wird Rheinwasser auf Trinkwasserqualität aufbereitet und dem Grundwasser über Infiltrationsmaßnahmen im Hessischen Ried wieder zugeführt. Das Werk wird vom Wasserverband Hessisches Ried (WHR) unterhalten. Das Rheinwasserwerk kann mit einer Kapazität von 5400 m³ pro Stunde und 130.000 m³ pro Tag, 43 Mio. m³ Rheinwasser pro Jahr auf Trinkwasserqualität aufreinigen. 5 Mio. m³ sind davon für landwirtschaftliche Zwecke vorgesehen, das restliche Wasser steht für eine Infiltration ins Grundwasser zur Verfügung, sofern dieses benötigt wird.

Jeder Grundwassermessstelle im Hessischen Ried ist hierzu im Grundwasserbewirtschaftungsplan ein Ziel-Grundwasserstand (Richtwert) zugeordnet. Wenn dieser, beispielsweise aufgrund ausbleibender Niederschläge und somit ausbleibendem Sickerwasser, unterschritten wird, werden die Infiltrationsmengen entsprechend erhöht. So wird u. a. die Grundwasserentnahme für die Trinkwasserversorgung des Rhein Main Gebiets sichergestellt, da die Wasserrechte automatisch an die Infiltrations-Möglichkeiten des Rheinwasserwerks gebunden sind und diese mit der Auflage erteilt werden, dass die Mengen aufgenommenen Grundwassers für die Trinkwasserversorgung wieder infiltriert werden.

In Abbildung 6-1 ist der Grundwasserstand der beispielsweise ausgewählten Station Gernsheim von 1985 bis 2012 dargestellt. Mit Inkrafttreten des Grundwasserbewirtschaftungsplans wurden die unteren Grenzgrundwasserstände (rot) und die Richtwerte (blau) eingeführt, wobei die Infiltration entsprechend gesteuert wird. Bei sinkenden Grundwasserständen in Richtung des roten Grenzgrundwasserstandes wird die Infiltration von aufbereitetem Rheinwasser intensiviert, so dass der Richtwert wieder erreicht wird. Bei zu feuchten Bedingungen wird die Infiltration nicht weiterbetrieben, wobei im extremen Verlauf ein steigender Grundwasserstand wegen starken und andauernd feuchten Perioden schwer technisch zu beeinflussen ist.

Abbildung 6-1: Ganglinie vom Grundwasserstand Messstelle Gernsheim

Quelle: HLUG (17.10.2012).

Das Hessische Ried weist eine Jahresdurchschnittstemperatur von ca. 10 °C und jährliche Niederschlagssummen von 500-650 mm auf. Auf den oft zu findenden leichten Sandböden werden, auch aufgrund der optimalen Vermarktungsmöglichkeiten in der Region, insbesondere Sonderkulturen wie Gemüse, Kräuter, Beeren und Spargel angebaut, wobei ein Anbau der sensiblen Kulturen ohne eine gesicherte Wasserversorgung nicht möglich ist. Bereits zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Vorläufer heutiger Beregnungsverbände gegründet. Heute sind die Flächen in großem Maße beregnungsfähig, wobei die Verbandsstrukturen weiterhin bestehen und weiter gefördert und gefordert werden. Einzelbetriebliche Wasserrechte werden durch die Genehmigungsbehörden nur noch in Ausnahmefällen erteilt. Nahezu 25.000 ha Flächen werden im Süden Hessens mit Grundwasser versorgt und 5500 ha mit aufbereitetem Rheinwasser.

6.5 Die Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main

Wiesbaden und Frankfurt als bevölkerungsstarke und politisch bzw. wirtschaftlich wichtige Städte in der Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main (Abbildung 6-2) beziehen ca. 30 % ihres Wasserbedarfs aus dem hessischen Ried, wobei das gesamte Wasseraufkommen der beiden Städte bei ca. 100 Mio. m³ liegt.

Abbildung 6-2: Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main

Quelle: Regionalverband Frankfurt/Rhein-Main (2017).

In der gesamten Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main wohnen aktuell ca. 5,6 Mio. Menschen. Die Einwohnerzahl ist in den letzten fünf Jahren um 6,2 % gestiegen und wird laut Prognosen weiterhin steigen. Es wird Wohnraum und Infrastruktur benötigt, um die Menschen zu versorgen. Neben einem erhöhten Flächenbedarf wird es folglich auch rund um die Ressource Wasser Nutzungskonflikte geben. Die Landwirtschaft konkurriert mit der öffentlichen Wasserversorgung und der Industrie bzw. dem Gewerbe und dem Naturschutz in Quantität und Qualität um die Ressource Wasser.

6.6 Zusammenfassung

Die Einhaltung des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried sorgt u. a. dafür, dass die Trinkwasserversorgung des Rhein-Main Gebiets sichergestellt werden kann, indem eine aktive Beeinflussung des Grundwasserstandes über Infiltration von Rheinwasser vorgenommen wird. Durch steigende Bevölkerungszahlen in der Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main werden weitere Nutzungskonkurrenzen bzw. Nutzungskonflikte zwischen der öffentlichen Trinkwasserversorgung, der Industrie und der Landwirtschaft rund um die Ressource Wasser auftreten. Im Dialog können dabei viele Konfliktsituationen aufgelöst werden. Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen

gen wie z. B. Feldtage können das Vertrauen und das Verständnis für die Bedürfnisse der regionalen Lebensmittelproduktion festigen und aufzeigen. Die wasserrechtlichen Bestimmungen geben dabei klare Regeln vor, nach denen die Wassernutzung erlaubt bzw. gestattet ist. Allen Beteiligten wird somit Rechts- und Planungssicherheit gegeben und die Versorgung mit Trinkwasser sichergestellt.

Literatur

Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) i.d.F.v. 11. Oktober 2010

Hessisches Ministerium für Wirtschaft/HessenAgentur: Bevölkerungsvorausschätzung für Hessen und seine Regionen als Grundlage der Landesentwicklungsplanung. Wiesbaden, März 2015

Hessisches Wassergesetz (HWG) i.d.F.v. 28. September 2015

Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (EU-Wasserrahmenrichtlinie - WRRL)

Regierungspräsidium Darmstadt: Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried. Darmstadt, 9. April 1999

Regionalverband FrankfurtRheinMain (2017) <https://www.region-frankfurt.de/Regionalverband/Region-in-Zahlen>

Wasserverband Hessisches Ried (WHR) <http://www.wasserverband-hessisches-ried.de/html/berichte.html>

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie <http://www.hlug.de/static/pegel/wiskiweb2/> (2012/2017)

7 Effiziente Bewässerungstechnik und -steuerung – Stand und Trends

Ekkehard Fricke

Landwirtschaftskammer Niedersachsen

7.1 Allgemein

Vor dem Hintergrund einer steigenden Bedeutung der Bewässerung aufgrund klimatischer Veränderungen und der Tatsache, dass auch bisher unbewässerte Flächen immer häufiger beregungstechnisch erschlossen werden, kommt dem effizienten Einsatz des Betriebsmittels Wasser zukünftig eine wachsende Bedeutung zu. Hinzu kommt, dass die genehmigten Wassermengen dem landwirtschaftlichen Betrieb Grenzen beim Wassereinsatz setzen und daher jeder Millimeter Wasser möglichst gewinnbringend eingesetzt werden sollte.

Es lohnt sich daher einerseits ein Blick auf die vorhandenen Bewässerungstechniken, um mögliche Effizienzsteigerungspotentiale aufzudecken, andererseits sollte auch die Bewässerungssteuerung durch den Landwirt kritisch unter die Lupe genommen und auf Optimierungspotentiale hin untersucht werden.

7.2 Bewässerungstechniken

Mobile Beregnungsmaschine mit Großflächenregner

Nach wie vor ist die mobile Beregnungsmaschine mit Großflächenregner die am weitesten verbreitete Beregnungstechnik in Deutschland, siehe Abbildung 7-1 a. Die Gründe dafür liegen v. a. in der hohen Flexibilität und Mobilität dieser Technik und den vergleichsweise geringen Kosten bei der Anschaffung. Nachteilig sind aber v. a. die hohen Energiekosten im Betrieb und die schlechte Wasserverteilung bei Wind. In den letzten Jahrzehnten hat sich in Bezug auf Rohrlängen und Rohrdurchmesser einiges verändert, sodass heute mobile Beregnungsmaschinen mit bis zu 1.000 m Rohrlänge bei 125 mm Rohrdurchmesser verfügbar sind, die je Aufstellung nicht mehr 2 ha, wie vor einigen Jahrzehnten, sondern bis zu 8 ha Fläche bewässern können.

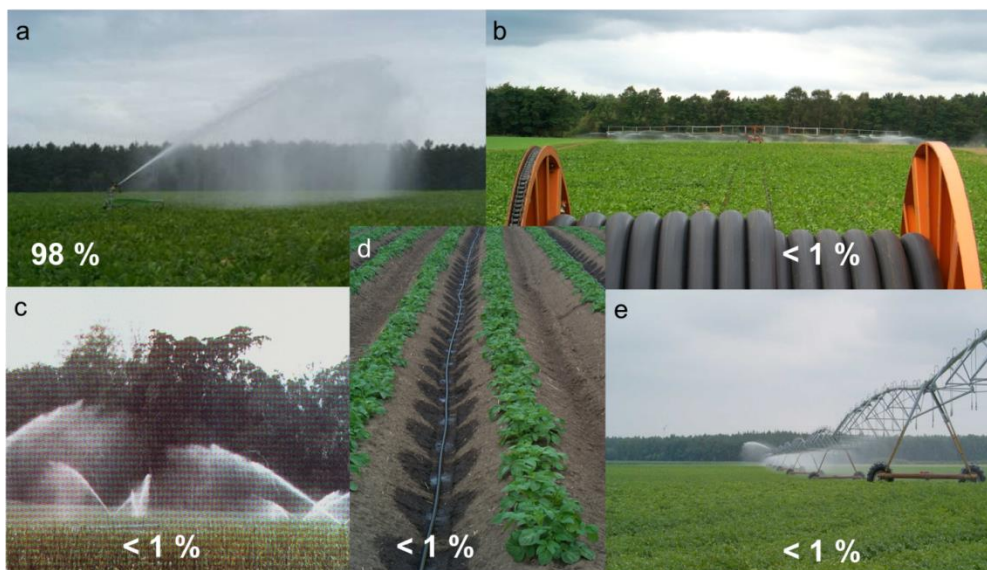
Aufgrund mehrerer kurz- und mittelfristig nicht zu beeinflussender Rahmenbedingungen wird die mobile Beregnungsmaschine in Deutschland und v. a. in Niedersachsen auch zukünftig eine zentrale Rolle bei der Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen einnehmen. Einige Optimierungsmöglichkeiten bieten sich jedoch auch bei dieser Technik an.

Um die Arbeitsabläufe planbarer zu gestalten und Störungen zeitnah beheben zu können, bieten verschiedene Hersteller webbasierte Dokumentations- und Überwachungssysteme an. Hierbei sind auf den Regnern GPS-Sender und Drucksensoren installiert, welche die Standort- und Betriebsdaten permanent an einen Webserver senden. Störungen im Einzug oder Druckabfälle im System werden sofort gemeldet, sodass der Aufwand für die üblichen Kontrollfahrten erheblich

reduziert werden kann. Die Systeme können zudem mit der Pumpensteuerung gekoppelt werden, sodass Elektro- oder auch Dieselpumpaggregate per Smartphone gestartet werden können.

Gerade beim Start oder Ende des Regnereinzuges werden immer wieder Straßen oder angrenzende Grundstücke mit beregnet. Diese Beregnung von Nicht-Kulturflächen und Verkehrswegen sollte unbedingt vermieden werden, da zum einen eine erhebliche Gefährdung für Verkehrsteilnehmer entstehen kann und zum anderen wertvolles Beregnungswasser verschwendet wird. Verschiedene Hersteller bieten hier Möglichkeiten zur weg-, zeit- oder positionsabhängigen Steuerung von Strahlstörern und Sektorschaltungen an. Im Idealfall kann so ein nahezu rechteckiger Beregnungsbereich am Feldrand erreicht werden.

Abbildung 7-1: Bewässerungsverfahren in Deutschland und deren Verbreitung in Niedersachsen



Quelle: E. Fricke (2017).

Mobile Beregnungsmaschine mit Düsenwagen

Anstelle des Großflächenregners kann an der mobilen Beregnungsmaschine auch ein Düsenwagen zur Wasserverteilung eingesetzt werden. (Abbildung 7-1 b). Die Vorteile eines Düsenwagens sind die deutlich bessere Wasserverteilung gegenüber dem Großflächenregner bei Wind und der um ca. 2 bar geringere Druck an den Düsen, was einer Energieeinsparung von etwa 20 % entspricht. In kleinen Gemüsebaubetrieben oder zur Bewässerung von pflanzenbaulichen Versuchen, z. B. bei der LWK Niedersachsen, werden Düsenwagen aufgrund der guten Wasserverteilgenauigkeit eingesetzt. Ansonsten haben sie sich trotz der genannten Vorteile in der breiten Praxis nicht durchgesetzt, was an dem höheren Arbeitszeitbedarf bei Auf- und Abbau und am hohen Kapitalbedarf liegt.

Ganz allgemein gilt beim Einsatz mobiler Beregnungsmaschinen: Um den Energieeinsatz im gesamten Bewässerungssystem zu reduzieren, sollten sowohl in der Beregnungsmaschine als auch bei den Zuleitungen ausreichend große Leitungsquerschnitte gewählt werden. Eine kritische Betrachtung der Leitungsdimensionierung und des gesamten Beregnungssystems bietet sich insbesondere in älteren Beregnungsnetzen an. Oftmals rechnet sich der Einbau groß dimensionierter Leitungen durch die erzielten Energieeinsparungen innerhalb weniger Jahre. Möglichkeiten der Vergrößerung der Leitungsquerschnitte ergeben sich auch durch die Verlegung von Parallelleitungen oder die Schaffung von Ringschlüssen, bei denen das Wasser den Hydranten von beiden Seiten anströmen kann.

Großflächenbewässerungstechnik

Für groß strukturierte Flächen ab 25 ha Größe eignen sich vor allem Kreis- und Linearberegnungsmaschinen. (Abbildung 7-1 e). Diese teilortsfesten Anlagen applizieren das Beregnungswasser energieeffizient und mit einer hohen Verteilgenauigkeit durch von den Tragwerken abgehängte Niederdruckdüsen. Bei Kreisberegnungsanlagen nimmt die Düsengröße mit zunehmender Entfernung vom Zentralturm zu, sodass auf diese Weise eine gleichmäßige Verteilung über die gesamte Anlagenlänge, was v. a. bei Windeinfluss von Bedeutung ist, gewährleistet ist. Die dichte Bestückung mit Düsen erfordert nur geringe Wurfweiten an den Einzeldüsen, was einen energieeffizienten Betrieb dieser Anlagen mit geringem Wasserdruck ermöglicht. Der Einspareffekt an Energie liegt im Vergleich zur mobilen Beregnungsmaschine mit Großflächenregner bei mindestens 50 bis 60 %. Neben der Energieeinsparung liegt ein weiterer großer Vorteil der Großflächenberegnungstechnik in der enormen Arbeitszeiterparnis im Vergleich zu allen anderen bekannten Techniken. Nachteile dieser Technik sind die Anforderungen an die Flächengröße und Struktur sowie die fehlende Möglichkeit, den beregnungswürdigen Kulturen in der Fruchtfolge folgen zu können. Die Investitionskosten dagegen entsprechen etwa denen bei Erschließung mit mobilen Beregnungsmaschinen.

Tropfbewässerung

Eine weitere, in ariden Klimaräumen häufig anzutreffende Bewässerungsform, stellt die Tropfbewässerung dar. (Abb. 7-1 d). Bei uns in Deutschland wird diese Technik vor allem in Kulturen wie Erdbeeren, Spargel, Zucchini oder im Strauchobstanbau eingesetzt. Im klassischen Ackerbau, v. a. im hiesigen Kartoffelanbau – die Kartoffel wäre aufgrund des Anbaus im Damm für eine platzierte Wasserabgabe prädestiniert –, konnte sich die Technik aufgrund des hohen Material- und Arbeitseinsatzes und der dadurch bedingten hohen Verfahrenskosten bislang noch nicht durchsetzen. Bei der Mechanisierung des Anbauverfahrens mit Tropfbewässerung besteht aktuell noch Entwicklungsbedarf. Während einige Hersteller relativ einfache und kostengünstige Systeme zur Verlegung der Tropfschläuche in die Kartoffeldämme anbieten (siehe Abbildung 7-2), sind bei der Tropfschlauchentnahme vor der Kartoffelernte oftmals noch mehrere Durchfahrten und Arbeitsschritte notwendig. Wünschenswert wäre hier die Entwicklung eines möglichst vollmechanisierten Systems zur Tropfschlauchentnahme während oder kurz vor der Kartoffelernte. Die Vorteile der Tropfbewässerungstechnik, wie z. B. die exakte Wasserverteilung, bei der die Pflanze trocken bleibt und eine deutliche Reduzierung des Betriebsdruckes und damit der Energiekosten im Be-

wässerungssystem, liegen klar auf der Hand. Zudem kann beim Einsatz einer entsprechend ausgerüsteten Kopfstation eine Düngung über die Tropfschläuche, die sogenannte Fertigation, erfolgen.

Eine Entwicklung, die die Tropfbewässerung anwendungsfreundlicher gestalten soll, ist die Unterflurtropfbewässerung. Dabei werden die Tropfrohre in 30-40 cm Tiefe im Abstand von 50-100 cm verlegt. Eine solche Anlage, über die auch eine Nährstoffzufuhr erfolgen kann, soll eine Lebensdauer von minimal zehn Jahren haben. Damit wären die hohen jährlichen Verfahrenskosten durch Verlegen und Entnehmen erheblich reduziert. Praxiserfahrungen in Deutschland gibt es bisher leider nur wenig.

Abbildung 7-2: Tropfbewässerung bei Kartoffeln a: Dammformung und Verlegen der Tropfschläuche in einem Arbeitsgang b: Damm mit exakter Wasserversorgung pro Kartoffelpflanze c: freigelegter Tropfschlauch im Damm



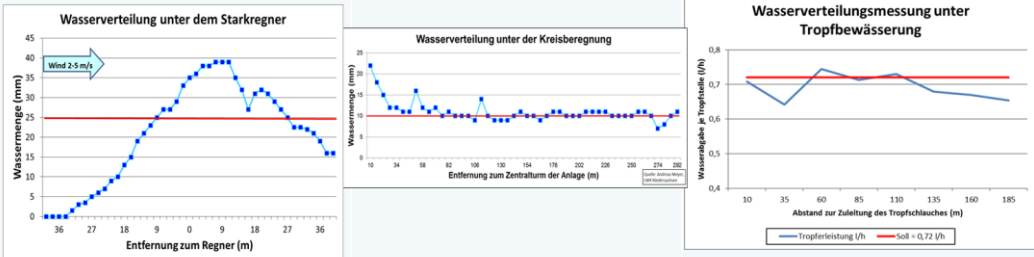
Quelle: a und b: NETAFIM c: A. Riedel (2017).

Sprinklerberegnung

Zur berechnungstechnischen Erschließung kleiner Flächen oder beim Anbau von Frühkartoffeln kommen neben der klassischen Rohrberegnung zunehmend auch Sprinkler zum Einsatz. Die Systeme bestehen in der Regel aus Kunststoffflachschläuchen, welche im Abstand von zehn bis zwölf Metern im Bestand ausgelegt werden. Auf dem Schlauch beträgt der Regnerabstand rund zehn Meter. Die Ein- oder Zweistrahlgewässer werden etwa einen Meter über der Bodenoberfläche an Stativen positioniert und bieten auch bei geringen Beregnungsintensitäten eine ganzflächige und relativ gleichmäßige Wasserverteilung. Gepaart mit einem niedrigen Betriebsdruck von 2,5 bis 4 bar ergibt sich somit eine Möglichkeit zur energie- und wassersparenden Frostschutzberegnung in Frühkartoffeln. Die Investitionskosten liegen mit rund 3.500 €/ha etwa bei der Hälfte der Anschaffungskosten für ein Rohrberegnungssystem. Aufgrund der Anschaffungskosten und Arbeits erledigungskosten beim Auf- und Abbau der Anlage eignet sich die Technik nur für Kulturen, welche eine ausreichend hohe Wertschöpfung generieren.

Ganz allgemein gilt: Eine effiziente Bewässerungstechnik sollte mit möglichst wenig Energie je gefördertem m³ Wasser auskommen, eine gute Verteilgenauigkeit des Wassers gewährleisten und hinsichtlich des Arbeitszeitbedarfs günstige Werte liefern. Abbildung 7-3 zeigt die Bewertung der drei wichtigen Bewässerungstechniken „Mobile Beregnungsmaschine“, „Kreisberegnung“ und „Tropfbewässerung“ in Bezug auf die genannten Kriterien. Dabei wurde die Verteilgenauigkeit des Wassers in eigenen Versuchen gemessen und die Werte für den Energieaufwand und den Arbeitszeitbedarf aus eigenen Erfahrungen abgeleitet.

Abbildung 7-3: Kriterien für eine effiziente Bewässerungstechnik

	Mobile Beregnungsmaschine	Kreisberegnung	Tropfbewässerung
Energieaufwand	~ 0,6 – 0,7 kWh/m ³	~ 0,2 - 0,3 kWh/m ³	~ 0,1 - 0,2 kWh/m ³
Wasserverteilung			
Arbeitsaufwand	1 h/ha/Saison	0,2 h/ha/Saison	20 h/ha/Saison

Quelle: Eigene Darstellung.

7.3 Bewässerungssteuerung

Um die Wirtschaftlichkeit von Bewässerungsmaßnahmen zu gewährleisten und die begrenzt zur Verfügung stehenden erlaubten Wassermengen einzuhalten, ist es notwendig, die Bewässerung möglichst genau zu steuern, d. h. den optimalen Zeitpunkt für den Beregnungseinsatz zu bestimmen und die richtige Gabenhöhe zu verabreichen.

Verschiedene Steuerungsmethoden, angefangen von der einfachen Spatendiagnose des Bodens bis hin zur Berechnung der Bodenfeuchte mittels komplexer Modelle, sind verfügbar (siehe Abbildung 7-4). Der alleinige Einsatz des „grünen Daumens“ reicht nicht aus, auch wenn langjährige Erfahrungen von großem Wert sind.

Abbildung 7-4: Verschiedene Verfahren, um den Beregnungszeitpunkt und die Beregnungsmenge zu ermitteln



Quelle: Eigene Darstellung.

Für eine detaillierte Bewässerungssteuerung sollten mehrere Fragen vorher beantwortet werden:

- Wann muss mit der Bewässerung in welcher Kultur begonnen werden?
- Wie hoch sollte die einzelne Wassergabe in Abhängigkeit des Wachstumsstadiums sein?
- Wann sollten weitere Wassergaben erfolgen?

Um diese Fragen zu beantworten, müssen v. a. Kenntnisse über den jeweiligen Standort vorliegen (siehe Abbildung 7-5.). Dies sind insbesondere die pflanzenverfügbare Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, die Durchwurzelungstiefe der jeweiligen Kultur auf dem Standort, die aktuelle Bodenfeuchte und die aktuelle Verdunstung. Wichtig ist auch ein verlässlicher Wetterbericht für die kommenden Tage und eine Abschätzung der zu erwartenden Produktpreise, um die Wirtschaftlichkeit jeder einzelnen Beregnungsgabe möglichst im Vorfeld bewerten zu können.

Abbildung 7-5: Einfluss der Bodenart auf die Wasserversorgung

Bodenart	S	SI	sL	tL	T	IU
Tiefe effektiver Wurzelraum (cm)	60	70	100	100	100	110
nFK Vol% (= mm/dm Boden)	10	14	16	14	13	22
100 % nFK eff. Wurzelraum (mm)	60	100	160	140	130	242
50 % nFK eff. Wurzelraum (mm)	30	50	80	70	65	121
Tage bis Grenze Trockenstress erreicht bei 4 mm Verdunstung / Tag	8	13	20	18	16	30
Gabenhöhe (mm) bis Maximum, incl. Verlustausgleich	20	33	42	42	42	42
Tage mit guter Wasserversorgung bei 4 mm Verdunstung pro Tag	5	8	10	10	10	10

Quelle: Eigene Darstellung.

Bodenfeuchtemessung

Um den Bodenwassergehalt und darüber den Bewässerungsbedarf zu ermitteln, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: die Messung oder die Berechnung des Bodenwassergehaltes. Für die Messung sind in Anlage 1 die wichtigsten Verfahren und Geräte, die für die Anwendung in der Landwirtschaft brauchbar sind, mit ihren Besonderheiten sowie Vor- und Nachteilen aufgelistet. Für jede Methode gibt es mehrere unterschiedliche Messgeräte, Hersteller, Ausstattungen und Qualitäten. Der Einbau von Sensoren muss sehr sorgfältig durchgeführt werden, weil die Ergebnisse sonst nicht verwertbar sind.

Der größte Nachteil jeder Bodenfeuchtemessung ist die Punktförmigkeit der Messung, d. h. bei nur einem Messpunkt (z. B. einer Sonde) ist die Aussagefähigkeit der Messung für den Gesamtschlag sehr begrenzt. Um zu einer repräsentativen Aussage für den Gesamtschlag zu kommen, müssten mehrere Geräte zum Einsatz kommen, was die Messmethode aber erheblich verteuert.

Bodenfeuchteberechnung

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung des Bodenwassergehaltes und des Beregnungswasserbedarfs ist die Berechnung mit unterschiedlichen Modellen oder Programmen. Rechenmodelle berücksichtigen im Gegensatz zur Messung die Bodeneigenschaften für einen Standort insgesamt. Die Kosten und der Aufwand in der Berechnung und der Handhabung durch den Nutzer sind sehr unterschiedlich. Die Tabelle in Anlage 2 zeigt eine Auswahl der z. Zt. in Deutschland für die Praxis angebotenen Produkte.

7.4 Fazit/Ausblick

Die in Deutschland eingesetzten Bewässerungstechniken entsprechen nicht alle den Anforderungen an eine effiziente Technik. Vor allem mit Blick auf den energetischen Aufwand und die Wasserverteilgenauigkeit sind die vorherrschenden Techniken nicht die effizientesten. Aufgrund von verschiedenen äußeren Rahmenbedingungen lässt sich der Einsatz der effizienteren Bewässerungstechniken nur bedingt ausweiten.

Im Bereich der Maschinen- und Pumpensteuerung hat sich in den letzten Jahren durch webbasierte Steuerungs- und Überwachungsmöglichkeiten einiges getan, was im praktischen Beregnungsbetrieb für deutliche Vereinfachung sorgt und den Betrieben hilft, auch eine größere Zahl von Maschinen effizienter einzusetzen.

Vor dem Hintergrund knapp bemessener wasserrechtlicher Erlaubnisse in den meisten Regionen Deutschlands, kommt dem sparsamen und sehr gezielten Einsatz des Wassers eine ständig steigende Bedeutung zu. Jeder eingesetzte Millimeter Bewässerungswasser ist an seinem zu erwartenden Erfolg zu messen. Verschiedene Möglichkeiten der Bewässerungssteuerung sind am Markt. Alle Methoden der Bodenfeuchtemessung haben aber den Nachteil der nur punktförmigen Messung und damit der nur eingeschränkt möglichen Übertragbarkeit auf den Gesamtschlag. Bodenfeuchteberechnungsmodelle sind daher für die Praxis besser geeignet, um großflächig Aussagen zum Bewässerungseinsatz zu tätigen.

Zukünftig werden vermutlich berührungslose Verfahren zur Abschätzung des Bewässerungsbedarfs Einzug halten, z. B. die Messung der Blattemperatur über Infrarotsensoren oder die Bodenfeuchterfassung vom Satelliten aus.

Anlage 1

Übersicht Messmethoden zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes

Messmethode	Messprinzip und gerätetechnische Voraussetzungen	Eignung für die Beregnungssteuerung unter Praxisbedingungen
Gravimetrische Methode	Direkte Bestimmung des Bodenwassergehaltes in Gewichts-% oder bei Berücksichtigung der Lagerungsdichte in Volumen-% durch Ermittlung des Gewichtsverlustes Geräte: Bohrstock, Trockenschrank/Ofen, Waage, evtl. Stechzylinder	– keine speziellen Messgeräte erforderlich – genaue Ergebnisse – Probenahme nicht zerstörungsfrei (Zeitreihen an gleicher Stelle nicht möglich) – hoher Arbeitsaufwand – Ergebnis nur bei guter Kenntnis des Bodens (Feldkapazität, Welkepunkt, Dichte) interpretierbar – nur eingeschränkt zur Anwendung für die Praxis zu empfehlen
Gipsblock/Watermark-Sensor	Messung des elektrischen Widerstands mit Umrechnung in Bodenwasserspannung (Saugspannung) Geräte: Gipsblöcke mit 1-3 jähriger Lebensdauer oder Watermark-Sensoren Widerstandsmeßgerät bzw. Auslesegerät; Datenlogger und Sender zur Datenübertragung möglich	– einfach handhabbar, wartungsfrei, frostsicher, kostengünstig – Messreihen am gleichen Punkt möglich, aber – träge Reaktion bei wechselnder Bodenfeuchte – Ergebnis einfach interpretierbar – Tendenz der Feuchteveränderung im Boden bei kontinuierlicher Messung und Auslesung erkennbar – Messbereich 0-2000 mbar (hPa) – als Orientierungshilfe geeignet zur Steuerung und Überwachung der Beregnung in Kulturen mit längeren Pausen zwischen den Beregnungsgaben
Tensiometer	direkte Messung der Bodenwasserspannung (Saugspannung) in mbar oder hPa Geräte: Tensiometer bestehend aus feinporiger Ton- oder Keramikzelle, Plexiglasrohr, Manometer; ggfs. Datenlogger oder -sender, automatisierte Bewässerungssteuerung möglich; alternativ: mobiles Gerät	– einfach handhabbar, kostengünstige Geräte – benötigt regelmäßig Wartung, aber bei Handauslesung keine Stromversorgung – nicht frostsicher – Messreihen am gleichen Punkt möglich – schnelle Reaktion bei wechselnder Bodenfeuchte – Ergebnis einfach interpretierbar – Feuchteveränderung im Boden bei kontinuierlicher Messung und Auslesung gut erkennbar – Messbereich 0-700 mbar (hPa) – geeignet zur Steuerung und Überwachung der Beregnung in Kulturen, die mit höherer Bodenfeuchtigkeit geführt werden, besonders auf leichten Böden mit hohem Anteil an schwach gebundenem Wasser

Messmethode	Messprinzip und gerätetechnische Voraussetzungen	Eignung für die Beregnungssteuerung unter Praxisbedingungen
TDR (Time Domain Reflectometry)- und FDR (Frequency Domain Reflectometry)-Sensoren	Messung des Bodenwassergehalts über die dielektrischen Eigenschaften des Bodens, die sich mit dem Wassergehalt ändern, Angabe in Volumen-% Geräte: Sensoren, Auslesegerät, Datenlogger, ggfs. Sender zur Datenübertragung, tlw. spezielles Einbauwerkzeug; alternativ: mobile Sonde	– Anschaffungspreis mittel bis hoch – Einbau teilweise aufwändig – wartungsfrei und frostsicher – Messreihen am gleichen Punkt möglich – bei Rohrsonden mehrere Tiefen an einer Sonde (Messpunkt) zu erfassen – sehr schnelle Reaktion bei wechselnder Bodenfeuchte – genaue Messergebnisse, tlw. aber nur nach Kalibrierung als absolute Werte vergleichbar – Ergebnis nur bei guter Kenntnis des Bodens (Feldkapazität, Welkepunkt, Dichte) interpretierbar – Feuchteveränderung im Boden bei kontinuierlicher Messung und Auslesung gut erkennbar – geeignet zur Steuerung und Überwachung der Beregnung in allen Kulturen durch Interpretation des Kurvenverlaufs

Anlage 2

Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Bewässerungsbedarfs

Name, Anbieter	Eigenschaften, Anwendung	Quelle im Internet	Kostenpflichtig
Geisenheimer Bewässerungssteuerung (Hochschule Geisenheim)	eigene Berechnung in Verbindung mit Wetterdaten zur potenziellen Verdunstung. Geringe Berücksichtigung des Bodenwasserhaushalts. Einfach durchführbar.	http://www.hs-geisenheim.de/forschungszentren/institut-fuer-gemuesebau/forschung/geisenheimer-steuerung.html	nein (nur Wetterdaten)
agrowetter (DWD)	Internet-Anwendung, basierend auf der Geisenheimer Methode, aber stärkere Berücksichtigung der Bodeneigenschaften. Einfach durchführbar.	http://www.dwd.de/agrowetter	ja (unter 100 €)
Zephyr (Ingenieurbüro Boden und Bodenwasser, Dr. R. Michel)	EDV-Programm zur eigenen Anwendung. Aufwand mittel, Beratung möglich	http://www.bodenwasser.de/beregn.html	ja (beim Anbieter zu erfragen)
Irrigama (Irrigama Projektgesellschaft) / Irrigama-Web	Beratungssystem, web-Anwendung geplant Mit Berücksichtigung des Bodenwasserhaushalts. Aufwand gering-mittel	http://193.25.32.158/projekte/fbm/images/bewaessrungstag2014/Vortrag_Modernes_Bewaesserungsmanagement.pdf	ja (beim Anbieter zu erfragen)
BOWAB (LBEG)	web-basiert, eigene Anwendung, Aufwand gering-mittel nur in Niedersachsen verfügbar	http://nibis.lbeg.de/cardomap3/Fachprogramme/Bodenwasserhaushalt	nein
Bewässerungs App (ALB Bayern e. V.)	web-basiert, eigene Anwendung, auch für Tropfbewässerung Aufwand gering-mittel nur in Bayern verfügbar	http://www.alb-bayern.de/De/Themen/Aussenwirtschaft/weihenstephan-bewaesserung-trockenheit_Bodenwasser-Modell	teilweise (unter 100 €)

8 Wem gehört das Wasser – ein Bericht der Wasserverbände

Godehard Hennies
Wasserverbandstag e. V.

Der Wasserverbandstag e. V. Bremen/Niedersachsen/Sachsen-Anhalt vertritt in den genannten drei Bundesländern die verbandliche Wasserwirtschaft mit ihren vielfältigen Aufgaben. Dies sind insbesondere der Küstenschutz, die Gewässerunterhaltung, die Trinkwasserversorgung, die Abwasserentsorgung und die Beregnung. Niedersachsen hat mit über 300.000 ha das größte Beregnungsgebiet Deutschlands.

Der Bundesverband DBVW e. V. (Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft) vertritt das Verbändemodell in acht Bundesländern. Er selber ist Mitglied im Europäischen Verband EUWMA (European Water Management Association). Dort sind Verbände aus neun Mitgliedsstaaten vereint.

Der rechtliche Rahmen der Wasserwirtschaftspolitik ist durch den Vertrag über die Europäische Union EUV, 01.12.2009 Vertrag von Lissabon und den Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union AEUV gekennzeichnet. Art. 191 AEUV legt die allgemeinen Ziele und Grundsätze für das europäische Umweltrecht fest. Des Weiteren sind in Art. 288 AEUV die Verordnungen, Richtlinien und Beschlüsse, z. B. EU-WRRL, Vogelschutzrichtlinie und FFH angesprochen. Insbesondere aber ordnet die Wasserrahmenrichtlinie die europäische Wasserpolitik. In 28 Artikeln und 10 Anhängen ist das Flussgebietsmanagement geregelt. Strategische und operative Ziele, ein strenges Fristenregime sowie die Bewirtschaftungspläne als grundlegendes Instrument kennzeichnen diesen vom Parlament im Jahr 2000 festgelegten Rahmen. Bis 2027 sollen die europäischen Wasserkörper den guten Zustand erreichen. Daneben sind das Verschlechterungsverbot und das Verbesserungsgebot zu beachten.

Auf Bundesebene setzt das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) diese Vorgaben um. Nach der Föderalismusreform im Jahr 2006 hat der Bund das Vollrecht über den Wasserhaushalt erhalten, Art. 74 Abs. 1 Nr. 32 Grundgesetz. In § 4 WHG ist u. a. folgendes geregelt: Wasser eines fließenden oberirdischen Gewässers und Grundwasser sind nicht eigentumsfähig. Das Grundeigentum berechtigt nicht zu einer Gewässerbenutzung, die einer behördlichen Zulassung bedarf, und auch nicht zum Ausbau eines Gewässers.

Das Bundesverfassungsgericht hat in seiner Entscheidung (BVerfGE 58, 300-353 Nassauskiesung) folgenden Leitsatz formuliert: Nr. 5: Es steht mit dem Grundgesetz in Einklang, dass das Wasserhaushaltsgesetz das unterirdische Wasser zur Sicherung einer funktionsfähigen Wasserbewirtschaftung – insbesondere der öffentlichen Wasserversorgung – einer vom Grundstückseigentum getrennten öffentlich-rechtlichen Benutzerordnung unterstellt hat. Diese Benutzerordnung ist in den §§ 6 und 8 ff. WHG besonders geregelt. Die Entnahme von Wasser aus oberirdischen Gewässern oder Grundwasser zum Zwecke der landwirtschaftlichen Beregnung ist eine Benutzung des Gewässers.

Der Wasserverbandstag e. V. hat in einem Leitfaden zusammen mit dem Deutschen Verband des Gas- und Wasserfaches die Wasserrechtsverfahren für Grundwasserentnahmen beschrieben. Als Beispiel für den Inhalt eines Wasserrechtsantrages kann die folgende Aufzählung dienen:

- Förmlicher Antrag mit Unterschrift,
- Erläuterungsbericht,
- hydrogeologisches Gutachten,
- bodenkundliches Gutachten,
- ökologisches Gutachten,
- Umweltverträglichkeitsuntersuchung.

Der Bewilligungsbescheid der zuständigen Wasserbehörde schließt das Verfahren ab und regelt u. a. folgende Aspekte: Bewilligungsmenge, Entnahmebrunnen, Befristung, Auflistung Antragsunterlagen, Bedingungen und Nebenbestimmungen, Einwendungen, Begründungen, Kostenentscheid, Rechtsbehelfsbelehrung sowie Durchführungsplan und Beweissicherung.

Zentrales Instrument in Niedersachsen ist der Grundwasserbewirtschaftungserlass des Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz zur mengenmäßigen Bewirtschaftung des Grundwassers vom 29.05.2015. Der Vorrang der Trinkwasserversorgung, der Sicherheitszuschlag für Trinkwasser und die landwirtschaftliche Beregnung (nur Erlaubniserteilung, regelmäßig für 20 Jahre) sind wesentlicher Regelungsinhalt.

In einem Ausblick für Niedersachsen ist das Pilotvorhaben „vier Grundwasserkörper“ (4 GWK) von zentraler Bedeutung. Es untersucht gem. § 4 Grundwasserverordnung den mengenmäßigen guten Grundwasserzustand. Als Kriterien gelten: keine negative Trendentwicklung der Wasserstände, Einhaltung der Bewirtschaftungsziele für Oberflächengewässer, keine Verschlechterung des Zustandes der Oberflächengewässer, kein Zustrom von Salzwasser und keine signifikante Schädigung der grundwasserabhängigen Landökosysteme (gwa-LÖS). Allein zu letzterem sind in Niedersachsen 273 Gebietskulissen identifiziert worden. Die Projektziele umfassen folgendes:

- Die Ursachen (Einflussfaktoren) der festgestellten Grundwasserstandsänderungen, Abflussminderungen und/oder Veränderungen der Gewässer-biozöten sowie der Beeinträchtigung von gwa-LÖS sind ermittelt und bewertet.
- Die verfügbaren Methoden und Bewertungskriterien für die qualitative und quantitative Erfassung, Beschreibung und Bewertung der einzelnen Einflussfaktoren sind zusammengestellt und bewertet; ggf. erforderliche Verbesserungsvorschläge sind formuliert.
- Zur Beschreibung und Bewertung der Interaktion einzelner Einflussfaktoren (Wechselwirkungen im System) sind gekoppelte, systembezogene Beurteilungsmethoden vorgeschlagen und im Gebiet der vier GWK getestet worden.

- Die Auswirkungen der Einflussfaktoren (einzeln und gekoppelt) auf die Schutzgüter in Bezug auf Grundwasserstand, Oberflächengewässerabfluss, Gewässerbiozöten und ggf. gwa-LÖS sind bewertet.
- Zum Monitoring liegen Vorschläge für eine verbesserte Trendbeobachtung vor und für die zukünftige Bewertung des mengenmäßigen Zustands sind Methoden vorgeschlagen. Die landesweite Übertragbarkeit der vorgeschlagenen Methoden ist untersucht und bewertet worden.

Der Klimawandel und seine Folgen werden sich deutlich auf die Beregnung in Niedersachsen auswirken. Die Beregnungswürdigkeit ist für die Zeiträume bis zum Jahr 2100 berechnet worden. Für sieben Landkreise in Niedersachsen ist ein zusätzlicher Bewässerungsbedarf von bis zu 140 mm/Jahr dargestellt worden. Die zentrale Beregnung im Osten des Landes weitet sich den Berechnungen zufolge stark nach Westen aus. Selbst in der Grafschaft Bentheim wäre dann zusätzliches Beregnungswasser für die Landwirtschaft vonnöten. Grundwasser ist der wichtigste Bodenschatz in Deutschland. Dies gilt umso mehr für Niedersachsen.

9 Sensorgestützte Beregnungssteuerung – ein Blick in die angewandte Forschung

Jano Anter, Martin Kraft und Dr. Tina Langkamp-Wedde
Thünen-Institut für Agrartechnologie

9.1 Einleitung

Nordost-Niedersachsen ist das ackerbaulich intensivste Bewässerungsgebiet in Deutschland. Über Jahrzehnte haben Landwirte, Beratung und Firmen umfangreiches Wissen aufgebaut und nutzen dieses insbesondere zur Produktion von Kartoffeln und Zuckerrüben. Die Bedeutung der Bewässerung nimmt durch den Klimawandel in Deutschland und weltweit zu. Wasserverfügbarkeit und Bewässerung sind zentrale globale Zukunftsthemen. Ohne Bewässerung ist Pflanzenbau in vielen Teilen der Welt nicht denkbar. Dabei treten zunehmend Nutzungskonkurrenzen um die Ressource Wasser in den Vordergrund und erfordern neue, innovative Anpassungen im Sinne einer nachhaltigen Bewässerung.

Im Rahmen des EU-Förderprogramms EIP-Agri (Europäische Innovationspartnerschaft „Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit“) wird das Innovationsprojekt „Sensorgestützte Beregnungssteuerung in Kartoffeln“ (SeBeK) von 2017 bis 2019 mit rund 780.000 € von der Europäischen Union und dem Land Niedersachsen gefördert. In dem Innovationsprojekt arbeiten die Ostfalia Hochschule in Suderburg, das Thünen-Institut in Braunschweig (Institut für Agrartechnologie), die Landwirtschaftskammer Niedersachsen in Uelzen, die Universität Göttingen und ein Uelzener Landwirt als sogenannte Operationelle Gruppe gemeinsam am Thema „Nachhaltige Bewässerung“.

Die entsprechende Fortentwicklung der bestehenden Bewässerungssysteme für Intensivkulturen wie Gemüse und Kartoffel ist Thema der Operationellen Gruppe „Nachhaltige Bewässerung“. Grundlegendes Ziel ist die Schonung der Ressource Wasser durch Entwicklung einer weltweit einsetzbaren und möglichst intuitiv bedienbaren Messtechnik zur Bestimmung der Bewässerungsbedürftigkeit und Steuerung der Bewässerungstechnik für die trockenstressempfindlichen Kulturarten Kartoffel, Zuckerrübe und Gemüse.

In dem Innovationsprojekt soll ein Sensor, für den das Thünen-Institut über erste Ergebnisse zum Einsatz in Winterweizen verfügt, für den Einsatz in Kartoffeln angepasst werden. Es handelt sich um eine berührungslose Messung der Bestandstemperatur, die zur Ableitung des Bewässerungsbedarfs als geeignet erscheint.

Es wird angestrebt, im Anschluss an das Projekt und aufbauend auf den gewonnenen Erfahrungen in der Zusammenarbeit zu einer Verstetigung der Arbeit zu gelangen. Hierzu ist die Gründung eines ‚Instituts für nachhaltige Bewässerung‘ am Standort Suderburg eine Option.

9.2 Motivation

Die Entscheidung über Zeitpunkte und Mengen der Bewässerung basiert heute überwiegend auf den eigenen Erfahrungen der Landwirte und agrarklimatischen Modellen und Vorhersagen (z. B. „agrowetter Beregnung“ des Deutschen Wetterdienstes; Hinweisdienst des Fachverbandes Feldberegnung). Für eine weitere Optimierung und die Berücksichtigung schlagspezifischer Daten stehen verschiedene EDV-gestützte Modelle zur Verfügung. Der Aufwand für Datenbeschaffung und -eingabe begrenzt die Anwendung in der Praxis. Während die Modelle eine gute Grundlage für die Bewässerungssteuerung liefern, besteht bei den kulturartspezifischen Feinheiten noch Optimierungsbedarf (Riedel, 2014).

Der Ansatz, den Bewässerungsbedarf anhand von Bodenfeuchtemessungen mit Bodenfeuchte-sensoren zu bestimmen, wird durch die erhebliche Streuung und Unsicherheit der punktuellen Bodenfeuchtemessungen erschwert. Zudem sind Bodenfeuchtesensoren kostenintensiv (Thörmann et al., 2014).

Mit den derzeit verfügbaren Hilfsmitteln verbleiben bei den Bewässerungsentscheidungen Unsicherheiten, die einen optimalen Einsatz der Feldbewässerung und eine optimale Nutzung des aus verschiedenen Wasserkörpern für die Bewässerung entnommenen Wassers erschweren.

Die für Nordost-Niedersachsen dargestellte Problemlage besteht in ähnlicher Form in allen Bewässerungsgebieten Deutschlands und weltweit. Die für Niedersachsen erarbeiteten Lösungsansätze leisten daher neben der Optimierung der landwirtschaftlichen Urproduktion in Nordost-Niedersachsen einen wichtigen Beitrag zur Lösung ähnlicher Problemlagen in anderen Regionen und bieten Wettbewerbschancen für niedersächsische Unternehmen.

9.3 Methode

Das Innovationsprojekt verfolgt einen neuartigen Ansatz zur Bestimmung des tatsächlichen Trockenstresses und Beregnungsbedarfs direkt an den Pflanzen durch Messung der Bestandstemperatur. Erste Messungen mit dieser Technik wurden an Winterweizen durchgeführt. Ausreichend mit Wasser versorgte Bestände weisen an sonnigen Sommertagen eine Evapotranspiration von mehr als 8 mm pro Tag auf. Die Verdunstung kühlt die Bestände so weit ab, dass die an der Oberfläche gemessene Bestandstemperatur trotz der intensiven Sonnenbestrahlung mehrere Kelvin unterhalb der Umgebungstemperatur gehalten werden kann (Stark und Wright, 1985, Stark et al., 1991, Erdem et al., 2006).

Bei unzureichendem Wasserangebot tritt eine Stresssituation ein, auf die die Pflanzen mit einer Reduzierung der Stomataweite reagieren, woraus eine verringerte Transpiration folgt. Damit reduziert sich die Verdunstungskühlung der Pflanzen, was zu einer höheren Bestandstemperatur führt. Bei ausreichend starkem Trockenstress und abhängig von der Wettersituation kann die

Blatttemperatur von Kartoffeln nach eigenen Messungen um mehr als 4 °C über der Temperatur der Umgebungsluft und um bis zu 8 °C über der Blatttemperatur optimal wasserversorgter Pflanzen liegen. Bei Weizen wurden noch höhere Temperaturdifferenzen beobachtet (Balota et al., 2007, Kraft et al., 2015).

Mit berührungslosen Infrarotthermometern oder Thermografiekameras lässt sich die Temperatur von Kartoffelbeständen einfach und zerstörungsfrei messen, wobei die gemessene Fläche anders als bei Bodenfeuchtemessungen beliebig skaliert werden kann, sodass lokale Streuungen kaum ins Gewicht fallen. Aus der Bestandstemperatur und den gleichzeitig vor Ort gemessenen Wetterdaten lässt sich der Crop Water Stress Index (CWSI) (Jackson et al., 1981, Jackson et al., 1988) berechnen. Nach der definierten Gleichung von Idso (1981) rangiert der CWSI theoretisch von 0 (ungestresst) bis 1 (maximaler Stress). Veröffentlichungen aus der Türkei lassen erwarten, dass sich der CWSI bei Kartoffeln als Indikator und Schwellenwert für Bewässerungsentscheidungen eignet (Erdem et al., 2005).

Im Projekt werden die Bestandstemperatur und der CWSI in mehreren Bewässerungsversuchen sowie auf Praxisflächen gemessen. Begleitend erfolgen Messungen des Bodenwassergehalts, des Pflanzenwachstums, des relativen Wassergehalts (RWC), des Blattwasserpotenzials (Ψ) sowie Bildaufnahmen mit einer Farb- und einer Thermalkamera. Mit diesen Daten wird die Qualität der CWSI-Messung untersucht und das Messverfahren bewertet und optimiert. Aus dem (destruktiv zu bestimmenden) relativen Wassergehalt (RWC) und dem Potenzial (Ψ) der Blätter lassen sich Rückschlüsse auf den Trockenstress der Kartoffeln ziehen (van Loon, 1981).

9.4 Projektdurchführung und -vorhaben

Bereits 2016 konnten mit einer bestehenden Messstation des Thünen-Instituts auf einer Praxisfläche in Niendorf II Voruntersuchungen durchgeführt werden. Erste Grundfragen der Anwendung, z. B. die optimale Ausrichtung bei Messungen in Kartoffelbeständen, konnten dadurch vorab bearbeitet werden. Im ersten Jahr des Innovationsprojekts (2017) wurden dann die bestehende Messstation überarbeitet und zusätzlich 2 neue Stationen gebaut.

In der Wachstumsphase der Kartoffeln 2017 konnte eine Station auf der Versuchsfläche in Hamerstorf und eine Station auf der Praxisfläche in Niendorf II aufgebaut werden (siehe Abbildung 9-1). Die zweite Messstation für Niendorf II konnte nicht rechtzeitig fertiggestellt werden und findet somit ihren Einsatz erst im zweiten Projektjahr.

Auf der Versuchsfläche in Hamerstorf werden zwei Bewässerungsstrategien (optimale und reduzierte Bewässerung) mit einer unberegneten Variante begleitend gemessen und verglichen. Vergleichskriterien sind neben der Erntemenge und -qualität auch die betriebswirtschaftliche Bewertung der Bewässerungsstrategien. Aus den gewonnenen Messdaten sollen Aussagen zur Bewässerungssteuerung abgeleitet werden.

Die Messungen auf der Praxisfläche in Niendorf II dienen zum einen der Prüfung der überarbeiteten Messtechnik im Praxiseinsatz. Zum anderen ist für den späteren Routineeinsatz ein Verfahren zu entwickeln, das für heterogene Ackerschläge mit geringem Kostenaufwand (möglichst nur ein Sensor) zu repräsentativen Messergebnissen gelangt. Der im Projekt beteiligte Landwirt bietet hier ausgezeichnete Voraussetzungen, da aus einem früheren Projekt bereits Schlag-Kenntnisse vorliegen. Vergleichend werden konventionelle Methoden der Bewässerungsbedarfsermittlung (klimatische Wasserbilanz, Bodenfeuchtemodellierung) schlagspezifisch angewandt.

Abbildung 9-1: Erweiterte Messstation in Niendorf 2017



Quelle: J. Anter (2017).

Im zweiten Projektjahr (2018) sollen die geschaffenen Grundlagen fortentwickelt und für den Praxiseinsatz vorbereitet werden. Die gewonnenen Daten sollen in ein Verfahren der automatisierten Datenverarbeitung übernommen und nutzbar gemacht werden. Die Ableitungen auf Basis der Sensormessung und der Aussagen nach konventionellen Methoden werden verglichen. Es wird geprüft, inwieweit die Sensormessungen zur Optimierung der Steuerungsempfehlungen nach konventionellen Methoden eingesetzt werden sollten oder als alleinige Information dienen können.

Im dritten Jahr (2019) erfolgt auf dem Praxisbetrieb eine vergleichende Bewertung der konventionellen Bewässerungssteuerung mit der durch den Sensoreinsatz optimierten Steuerung. Exakte Versuchsergebnisse hierzu werden auf dem Versuchsfeld ermittelt. Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz des Verfahrens bei den Landwirten werden evaluiert. In Zusammenarbeit mit dem Praxisbetrieb wird die neue Messtechnik in den betrieblichen Ablauf integriert und getestet. Zum einen sind dabei die neu entwickelten Sensoren und Datenübertragungseinrichtungen – möglichst unter Nutzung der auf dem Betrieb vorhandenen Landtechnik – in ein auf Praxisflächen einsetzbares Messsystem zu integrieren. Hierbei sind sowohl mobile (z. B. Schlepper) als auch stationäre (z. B. Kreisregner) Systeme zu betrachten. Zum anderen müssen die regelmäßig durchzuführenden Messungen in den Arbeitsablauf der landwirtschaftlichen Praxis integriert werden. Dies ist nur in enger Kooperation zwischen Landwirtschaftsbetrieb und Wissenschaft möglich.

Parallel zu den praktischen Arbeiten werden die Ergebnisse während des Projekts in einer eigenen Tagung und drei Workshops diskutiert und in den nationalen und internationalen EIP-Kontext eingebracht. Darüber hinaus werden die Ergebnisse bei nationalen und internationalen Veranstaltungen vorgestellt. Feldführungen und Tagungen für Landwirte und Fachpublikum dienen der Verbreitung der Ergebnisse.

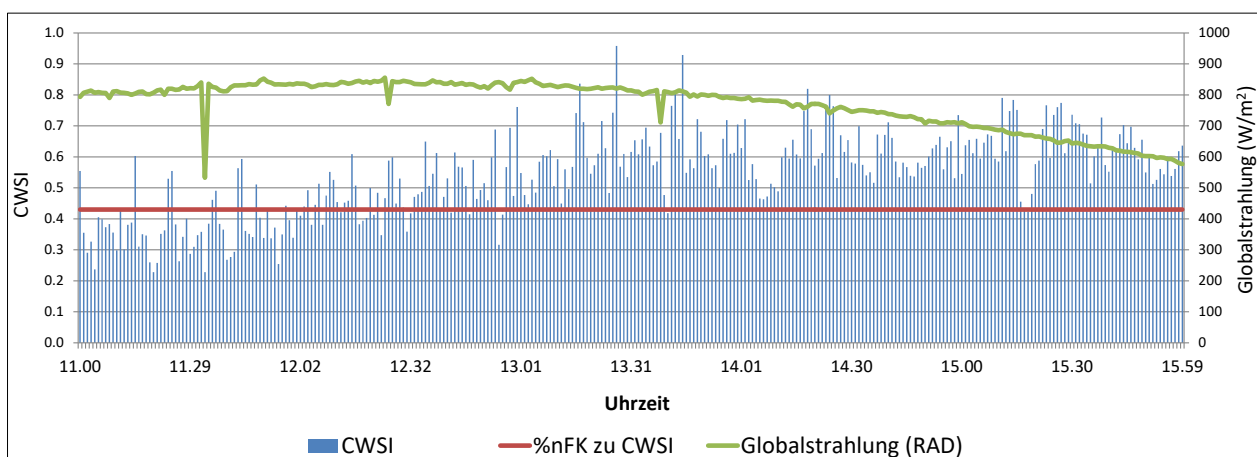
Fünf Ergebnisse aus den Messungen 2016

Derzeit basieren die Bewässerungsentscheidungen auf den Praxisflächen überwiegend auf den Empfehlungen des Klimamodells „agrowetter Beregnung“. In den ersten Messungen und Berechnungen 2016 wurde u. a. geprüft, ob und inwieweit sich aus dem CWSI-Verlauf vergleichbare Bewässerungsentscheidungen ergeben hätten. Bei den aufgeführten Ergebnissen ist zu beachten, dass einzelne Parameter, wie zum Beispiel der Bedeckungswiderstand bei potenzieller Transpiration (r_{cp}), für einen Winterweizenbestand berechnet wurden. Diese Parameter müssen für Kartoffelbestände angepasst werden.

Im Folgenden sind ausgewählte Messergebnisse wie der CWSI-Verlauf (blaue Balken), die Globalstrahlung (grüne Linie) und die aktuelle relative nutzbare Feldkapazität umgerechnet auf den CWSI-Wert (rote Linie) von drei verschiedenen Tagen zwischen 11:00 und 16:00 Uhr aufgeführt.

Die Abbildung 9-2 zeigt Messergebnisse eines gleichmäßig sonnigen Tagesabschnitts. Die Globalstrahlung erreicht in den Mittagsstunden um 13:00 Uhr ihre Höchstwerte von knapp über 850 W/m^2 . Die relative nutzbare Feldkapazität ist vom Deutschen Wetterdienst für diesen Tag mit 57 % berechnet worden. Um die nutzbare Feldkapazität mit dem CWSI zu vergleichen, wurde in den Abbildungen 9-2 bis 9-4 die relative Zahl der prozentualen nutzbaren Feldkapazität zur Umkehrung der Skalierung von 1 abgezogen (0,43). Die minutlichen CWSI-Werte schwanken von 0,23 bis 0,96 und liegen im Mittel bei 0,54. Nach der vereinfachten Annahme ist somit der mittlere CWSI in der Zeit von 11:00 bis 15:59 Uhr leicht überschätzt.

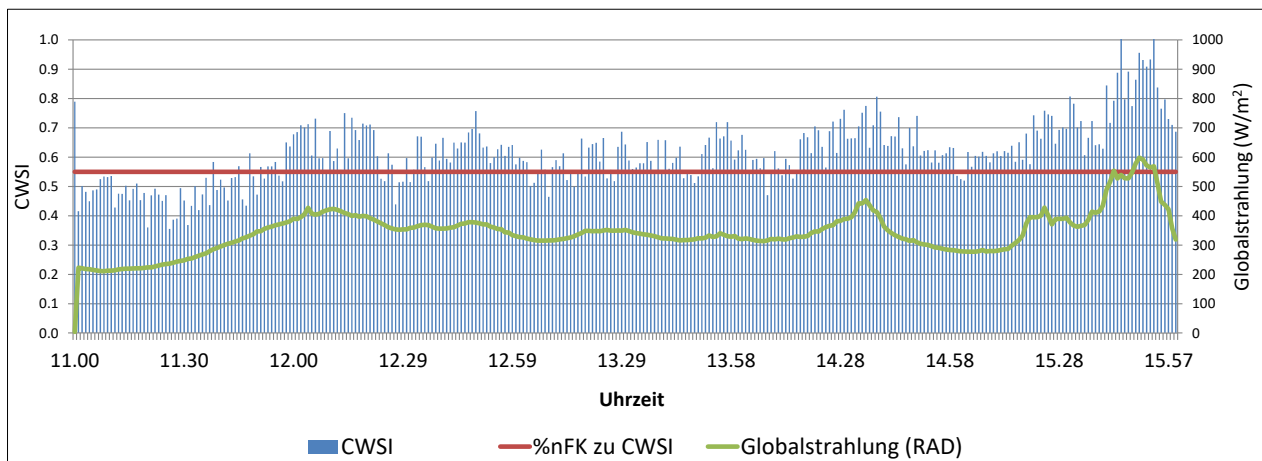
Abbildung 9-2: CWSI-Verlauf und Globalstrahlung am 20.07.2016



Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 9-3 ist ein gleichmäßig bewölkter Tagesabschnitt dargestellt. Die Globalstrahlung schwankt zwischen 200-600 W/m². Die nutzbare Feldkapazität liegt bei 45 %. Umgerechnet auf den CWSI ergibt das einen Wert von 0,55. Die CWSI-Werte schwanken in der Zeit von 11:00 bis 15:59 Uhr zwischen 0,35 und 1,02. Der durchschnittliche CWSI-Wert in dieser Messperiode ist mit 0,61 auch leicht überschätzt.

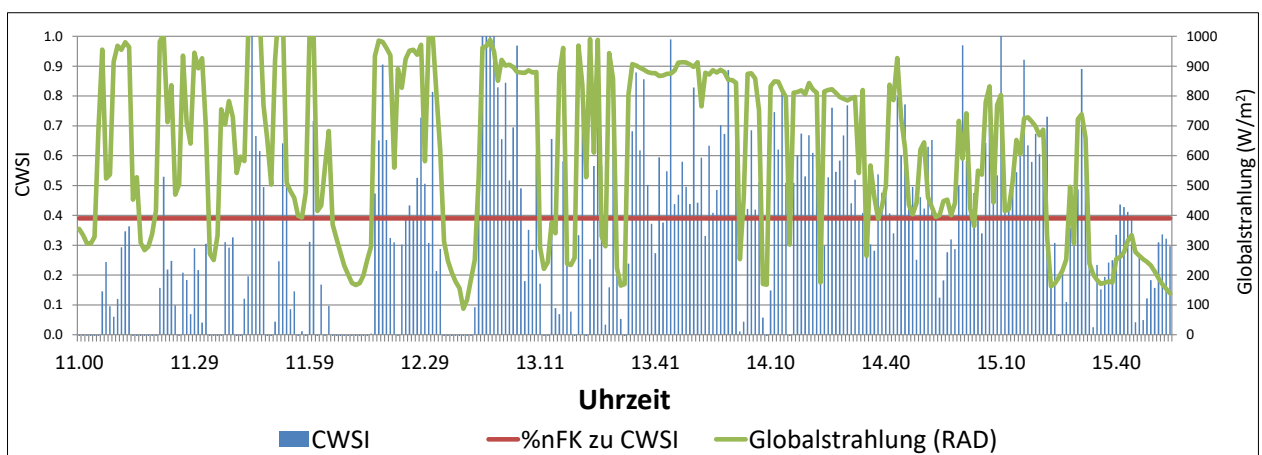
Abbildung 9-3: CWSI-Verlauf und Globalstrahlung am 23.07.2016



Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 9-4 ist mit dem 29.07.2016 ein sehr abwechselnd bewölkter Tag aufgeführt. Die Globalstrahlung schwankt sehr häufig von unter 300 W/m² bis über 1000 W/m². Die nutzbare Feldkapazität an diesem Tag (61 %) umgerechnet auf den CWSI beträgt 0,39. Die CWSI-Werte schwanken zwischen 11:00 bis 15:59 Uhr sehr häufig und stark von -0,69 bis 1,25. Im Mittel liegt der CWSI bei 0,32 und ist somit leicht unterschätzt.

Abbildung 9-4: CWSI-Verlauf und Globalstrahlung am 29.07.2016



Quelle: Eigene Darstellung.

Die aufgeführten Ergebnisse sind auf Grundlage vorläufiger Berechnungen eines für Winterweizen vorliegenden CWSI-Modells des Thünen-Instituts ermittelt worden. Die ersten Berechnungen zeigen zum einen, dass das CWSI-Modell an Tagen mit gleichmäßiger Wolkenbedeckung (wolkenlos oder bedeckt) Ergebnisse produziert, die im näheren Bereich der übertragenden prozentualen nutzbaren Feldkapazität liegen, und zum anderen, dass das CWSI-Modell an Tagen mit abwechselnder Wolkenbedeckung stark schwankende CWSI-Werte produziert.

9.5 Fazit und Ausblick

Durch die bestehende Messtechnik am Thünen-Institut konnten schon im Jahr 2016 erste Messungen in Kartoffeln auf dem Praxisbetrieb in Niendorf durchgeführt werden. Grundfragen der Anwendung, wie zum Beispiel die Ausrichtung, Anzahl und Höhe der Sensoren, konnten somit vor dem offiziellen Projektbeginn bearbeitet werden. Der CWSI konnte aus den gemessenen Daten jedoch nicht zuverlässig bestimmt werden, da noch mehrere in der CWSI-Formel für Winterweizen verwendete empirische Parameter auf die aerodynamischen und mikroklimatischen Randbedingungen von Kartoffelbeständen angepasst werden müssen. Um eine möglichst genaue Annäherung dieser Parameter sicherzustellen, wurden hierfür 2017 zusätzliche Messtechniken in Form einer Eddy-Kovarianz-Station, einem 2 m und 10 m Windmessmast und mehreren Bodenwärmestromplatten und Bodentemperaturfühlern in die Messungen auf einem Schlag in Niendorf II integriert. Zudem wurden die bestehenden Messstationen überarbeitet und mit neuen Infrarotsensoren bestückt.

Sehr enttäuschend waren in der Messperiode 2017 die Wetterbedingungen. Durch die ständigen und ergiebigen Niederschläge in der gesamten Wachstumsphase der Kartoffeln gab es keine längere Trockenphase und somit auch keinen Bewässerungsbedarf. Positiv ist aber, dass die neu entwickelten Messstationen auf ihren Einsatz erfolgreich geprüft werden konnten.

Im weiteren Verlauf des „SeBeK“-Projekts sind u. a. folgende Arbeitsschritte geplant:

- Messungen in 2018, um das CWSI-Modell und deren Parameter an Kartoffelbestände weiter anzupassen.
- Prüfung und Vergleich der daraus entstehenden Bewässerungsentscheidungen.
- Bei erfolgreicher Prüfung erfolgt die Implementierung des CWSI-Modells in den Praxisbetrieb für 2019.
- Anschließend Prüfung der neu eingesetzten Bewässerungssteuerung auf Wirtschaftlichkeit, Wassernutzungseffizienz, Auswirkungen auf Erntequalität und Wassereinsparungspotenziale.

Die Analyse der Messungen von 2016 zeigen, dass die Übertragung des CWSI-Modells von ariden auf humide Wetterbedingungen zwar möglich ist, jedoch weiteren Forschungsbedarf aufdeckt

und speziell an Tagen mit wechselnder Wolkenbedeckung eine differenzierte Auswertung notwendig macht.

Literatur

- Balota M, Payne WA, Evett SR, Lazar MB (2007) Canopy Temperature Depression Sampling to Assess Grain Yield and Genotypic Differentiation in Winter Wheat, *Crop Science* 47, 1518-1529
- Erdem T, Orta AH, Erdem Y, Okursoy H (2005) Crop water stress index for potato under furrow and drip irrigation systems. *Potato Research* 48, 49-58
- Erdem Y, Erdem T, Orta AH, Okursoy H (2006) Canopy-air temperature differential for potato under different irrigation regimes, *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Sciences* 56, 206-216
- Idso S B, Jackson R D, Pinter P J, Reginato R J, Hatfield J L (1981) Normalizing the stress-degree day parameter for environmental variability, *Agricultural Meteorology* 24 45-55
- Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, Pinter Jr P J (1981) Canopy temperature as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research* 17(4), 1133-1138
- Jackson R D, Kustas W P, Choudhury B J (1988) A Reexamination of the Crop Water Stress Index, *Irrigation Science* 9, 309-317
- Kraft M, Neeland H, Riedel A (2015) Vergleichende Ertragsvorhersage von Winterweizen- und Wintergerstensorten bei Trockenstress durch Messung der Bestandstemperatur, 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft und 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, 7. Mai 2015, Braunschweig. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 88, 113-123
- Riedel A (2014) Beregnungssteuerung in: Grocholl J, Anter J, Asendorf R, Feistkorn D, Mensching-Buhr A, Nolting K, Riedel A, Schossow R, Thörmann H-H, Urban B (2014): Wasser sparen im Ackerbau, *Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung – Forschungsergebnisse zu Anpassungsstrategien der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg an den Klimawandel*, Teil 4, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen, S. 86-100
- Stark J C, Wright J L (1985) Relationship between foliage temperature and water stress in potatoes. *Am. J. Potato Research* 62(2), 57-68
- Stark J C, Pavek J J, McCann iR (1991) Using Canopy Temperature Measurements to Evaluate Drought Tolerance of Potato Genotypes, *J Amer Soc Hort Sci* 116(3), 412-415
- Van Loon C D (1981) The effect of water stress on potato growth, development and yield. *American Potato Journal*, January 1981, Volume 58, Issue 1, pp 51-69

10 Verbesserung der Nährstoffeffizienz durch Bewässerung

Angela Riedel

Landwirtschaftskammer Niedersachsen

10.1 Einleitung

Wassermangel führt bei Pflanzen sowohl zu einer eingeschränkten Nährstoffaufnahme als auch zu einer verringerten Photosyntheseleistung. Dadurch verschlechtert sich die Ausnutzung der gedüngten Nährstoffe, das Wachstum vermindert sich und bei Kulturpflanzen wird letztlich auch der Ertrag reduziert. Länger anhaltende oder häufig auftretende Trockenperioden in der Vegetationszeit können also die Ursache für eine schlechte Effizienz der gedüngten Nährstoffe sein. Ein hohes Risiko hierfür besteht auf Standorten, bei denen die Niederschläge hinsichtlich der Höhe und Verteilung nicht für den Wasseranspruch der angebauten Kulturen ausreichen und die gleichzeitig Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität aufweisen. Hierbei handelt es sich häufig um sandige Böden, die durch ihr geringes Vermögen zur Wasserspeicherung eine hohe Austauschhäufigkeit des Bodenwassers aufweisen. Damit verbunden ist ein hohes Verlagerungsrisiko für Nährstoffe. Bleiben auf solchen Standorten nach einer schlechten Ernte viele Nährstoffe wie z. B. Nitrat im Boden zurück, kann eine Verlagerung mit dem Sickerwasser bis ins Grundwasser die Folge sein. Die Landwirtschaftskammer Niedersachsen geht in langjährig angelegten Versuchen der Frage nach, inwieweit die Nährstoffeffizienz durch Bewässerung erhöht und die Verlagerung von Stickstoff (N) vermindert werden kann.

10.2 Grundlagen

10.2.1 Definition Nährstoffeffizienz

Nährstoffeffizienz ist ein Ausdruck dafür, in welchem Ausmaß Kulturpflanzen das Angebot an Nährstoffen im Boden ausnutzen. Sie kann z. B. durch den Quotienten von Ertrag und Nährstoffangebot oder von Nährstoffabfuhr und -zufuhr ausgedrückt werden. Auch die Bilanzierung von Zufuhr und Abfuhr eines Nährstoffs ist ein Maß für dessen Effizienz.

Damit lassen sich einerseits Aussagen über die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes eines knappen Faktors treffen. Speziell bei der Effizienz gedüngter Nährstoffe geht es aber auch um den Grundwasserschutz.

10.2.2 Düngeverordnung

Vor dem Hintergrund des Gewässerschutzes schreibt die neue Düngeverordnung vom 26.05.2017 vor, dass ein Bilanzüberschuss für Stickstoff von 50 kg N/ha und Jahr im dreijährigen Durchschnitt

Rolle. Große Fortschritte in der Züchtung bei einigen Kulturen, wie z. B. Mais oder Zuckerrüben (Loock, 2013), haben die Erträge und damit die Nährstoffeffizienz deutlich ansteigen lassen. Dennoch ist die Trockenresistenz bei den Sorten noch nicht so stark ausgeprägt, dass gravierender Wassermangel nicht zu Ertragsminderungen führen würde (Riedel, 2014). Der Faktor Wasserverfügbarkeit ist maßgeblich vom Klima und vom Boden abhängig. Durch den Einsatz der Bewässerung hat der Landwirt aber die Möglichkeit, regulierend einzugreifen und die Wasserversorgung der Kulturen sicherzustellen.

10.2.4 Boden und Klima

Sandige Böden weisen in der Regel eine geringe nutzbare Feldkapazität (nFK) auf. Sie liegt je nach der Höhe der Anteile an Ton und Schluff und je nach Tiefe des effektiven Wurzelraums etwa zwischen 55 und 120 mm (Renger et al., 2009).

In weiten Teilen Niedersachsens fallen im Sommerhalbjahr, also in der Hauptvegetationszeit von April bis September, nicht genügend Niederschläge, um die von den Pflanzen verdunsteten Wassermengen ausgleichen zu können. Beispielsweise traten am Standort Hannover im Zeitraum von 1959 bis 2016 (58 Jahre) 46 Jahre mit negativer, und nur 12 Jahre mit positiver klimatischer Wasserbilanz auf. In extremen Trockenjahren (1959, 2003 und 2009) wurden Werte von etwa -400 mm erreicht. Wichtig ist jedoch auch die Verteilung der Niederschläge in der Hauptvegetationszeit der jeweiligen Kultur. Bei den Mähdruschfrüchten (Getreide und Raps) ist der Zeitraum April bis Juni entscheidend, während bei den Hackfrüchten, je nach Erntedatum, der Zeitraum Juni bis September bedeutsam ist. Niederschlagsdefizite in den jeweils ertragsrelevanten Zeitspannen können zu entsprechend negativen Auswirkungen auf die Erträge führen, wenn der Boden dann keine ausreichenden Mengen an gespeichertem Wasser zur Verfügung stellen kann. Drei ausgewählte Jahre sollen diese Effekte zeigen. Die Jahre 2010, 2011 und 2015 wiesen über das gesamte Sommerhalbjahr betrachtet für den Standort normale oder jedenfalls keine überdurchschnittlich negativen klimatischen Wasserbilanzen auf (-58, -82 und -140 mm). Dennoch gab es in diesen Jahren gravierende Trockenperioden. In 2010 führte eine extreme und über mehrere Wochen anhaltende Sommertrockenheit mit wöchentlichen klimatischen Wasserbilanzen von -30 bis -50 mm zu hohen Mindererträgen bei den Hackfrüchten. 2011 und 2015 waren niedrige Erträge vor allem beim Getreide das Ergebnis eines sehr trockenen Frühjahrs bzw. Frühsommers.

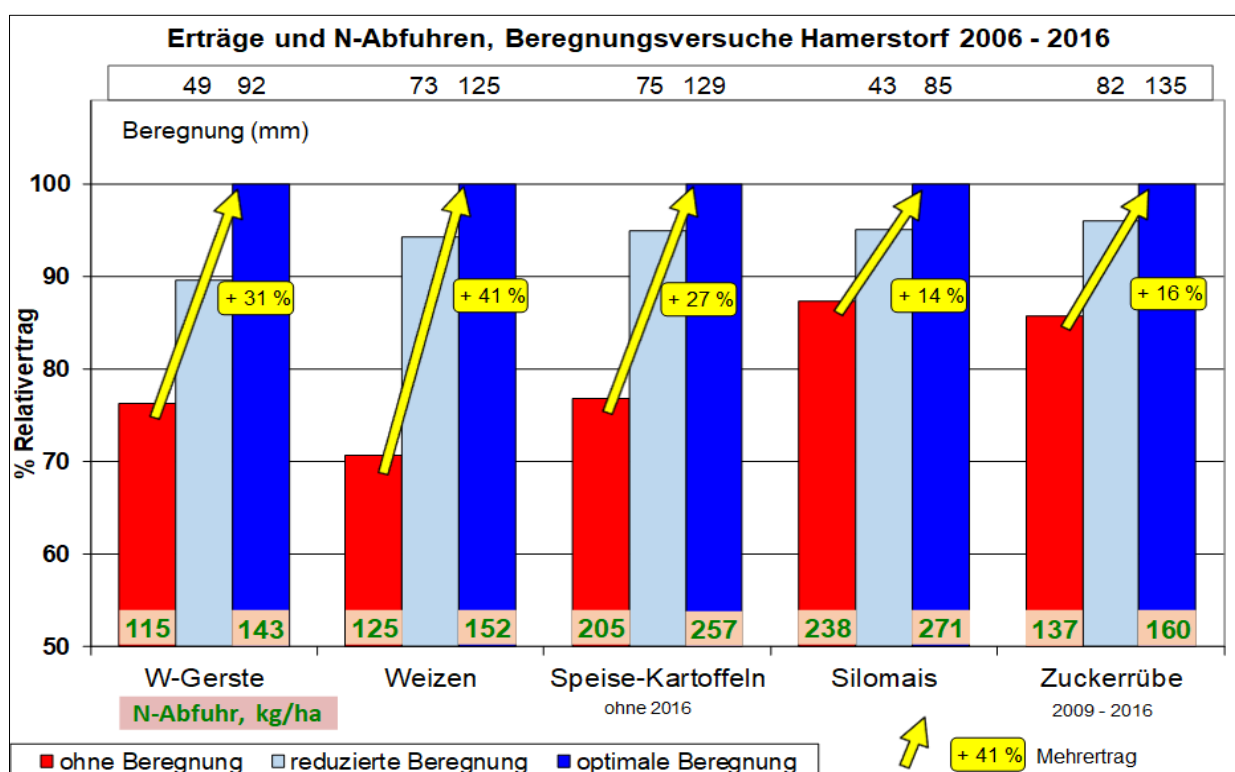
10.3 Versuchsergebnisse

Die Versuchsstandorte der LWK Niedersachsen für langjährig durchgeführte Beregnungsversuche befinden sich in der Region Nordost-Niedersachsen. Die mittleren Jahresniederschläge betragen hier 620 mm, die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 8,8 °C. Die erste Versuchsserie von 1995 bis 2004 fand am Standort Nienwohlde statt. Grundlage war hier ein sehr leichter Sandboden mit 26 Bodenpunkten. Am zweiten Standort Hamerstorf werden seit 2006 Beregnungsversuche durch-

geführt. Der Boden ist hier ein etwas besserer, schwach schluffiger bis lehmiger Sand mit 33 Bodenpunkten.

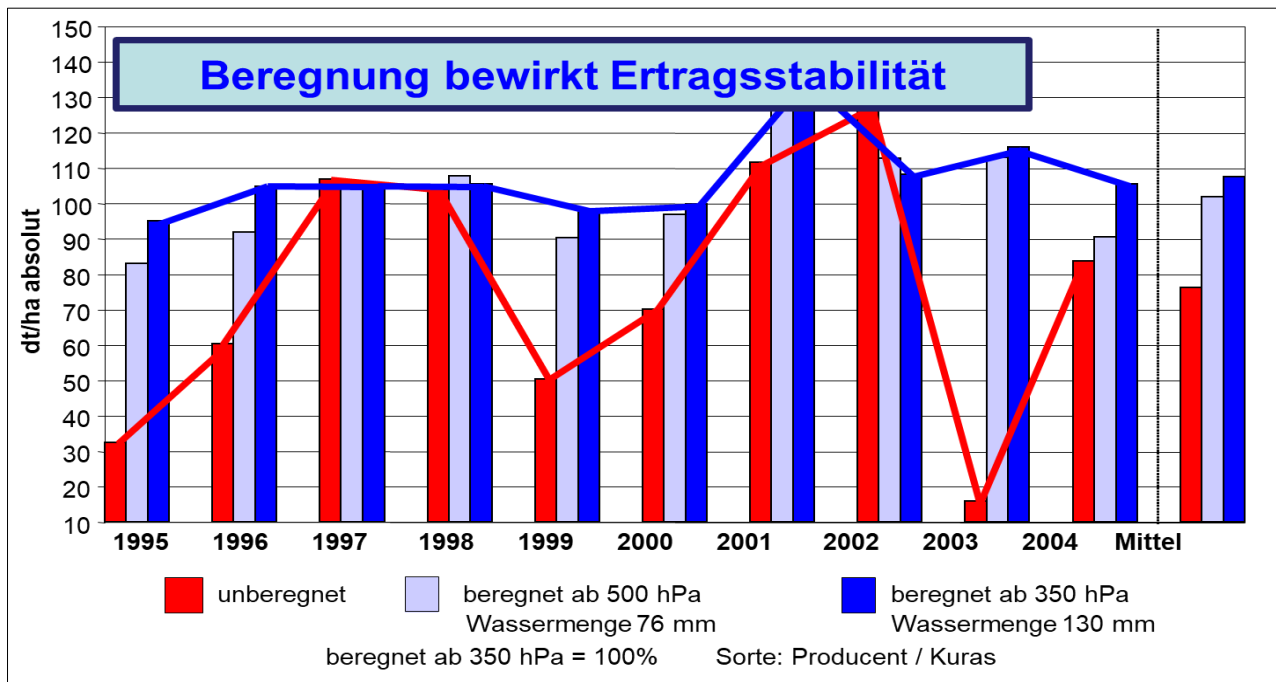
In Abbildung 10-2 sind die im Mittel der Jahre durch Beregnung erreichten Mehrerträge und die dadurch erhöhten N-Abfuhr vom Feld am Versuchsstandort Hamerstorf für verschiedene Kulturen dargestellt. An erster Stelle mit 41 % Mehrertrag steht der Weizen, gefolgt von Wintergerste und Kartoffeln mit jeweils um die 30 %. Zuckerrübe und Silomais zeigten auf dem Versuchsfeld mit nur 14-16 % Ertragszuwachs weniger positive Reaktionen auf Beregnung. Auf schlechteren Standorten mit reinen Sandböden und damit sehr geringer Wasserverfügbarkeit können aber auch bei diesen Kulturen höhere Mehrerträge möglich sein.

Abbildung 10-2: Mittlere Erträge und N-Abfuhr verschiedener Kulturen mit und ohne Beregnung (Standort Hamerstorf)



Quelle: Eigene Berechnungen.

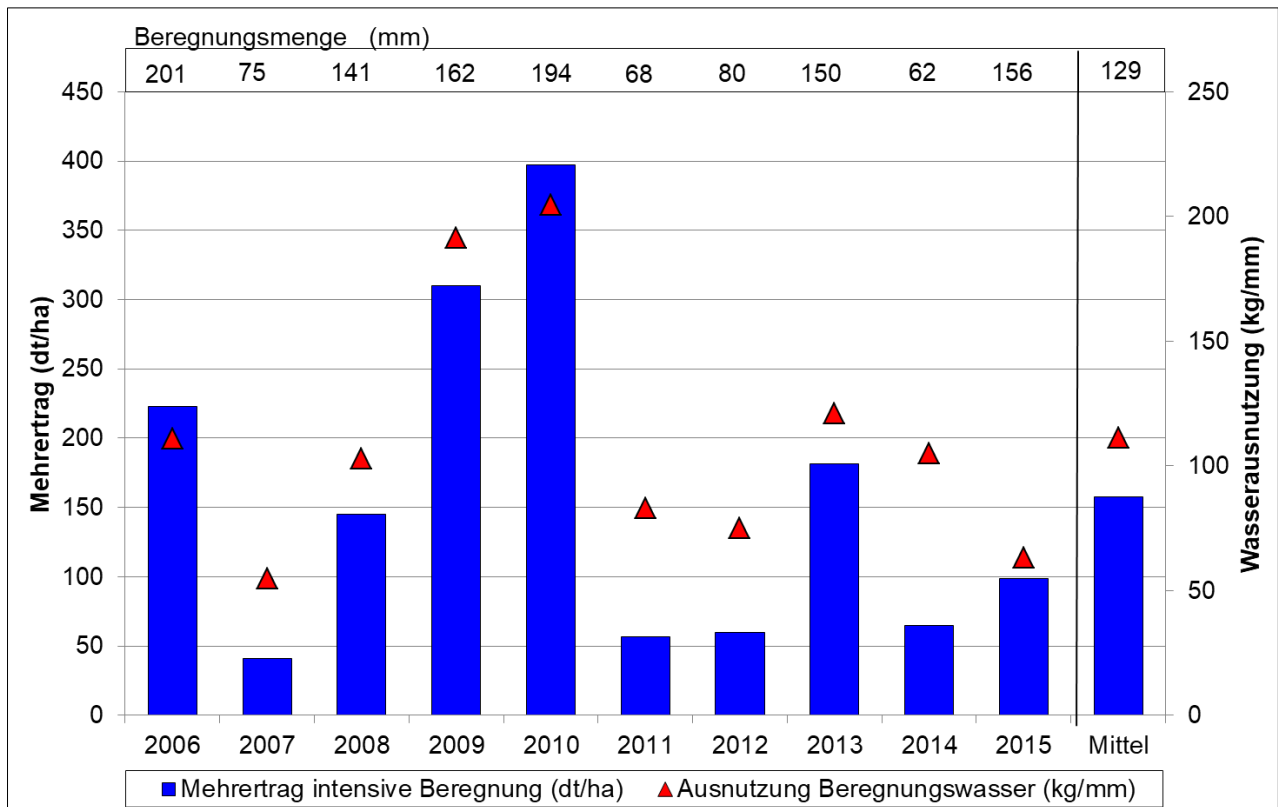
Die einzelnen Versuchsjahre am Standort Nienwohlde für die Kultur Stärkekartoffel zeigten ohne Beregnung sehr starke Ertragsschwankungen (Abbildung 10-3). Trockenjahre hatten deutliche Mindererträge zur Folge. Ohne Beregnung lagen die Stärkeerträge in fünf von zehn Jahren unter dem durchschnittlichen Ertrag. Die Ertragsdifferenzen zu den mit Beregnung erzielten Erträgen waren in diesen trockenen Jahren besonders hoch. Mit Beregnung konnte dagegen in jedem Jahr ein hohes Ertragsniveau und damit eine gute Nährstoffausnutzung erreicht werden.

Abbildung 10-3: Stärkeerträge von Kartoffeln (Standort Nienwohlde)

Quelle: Fricke (2007).

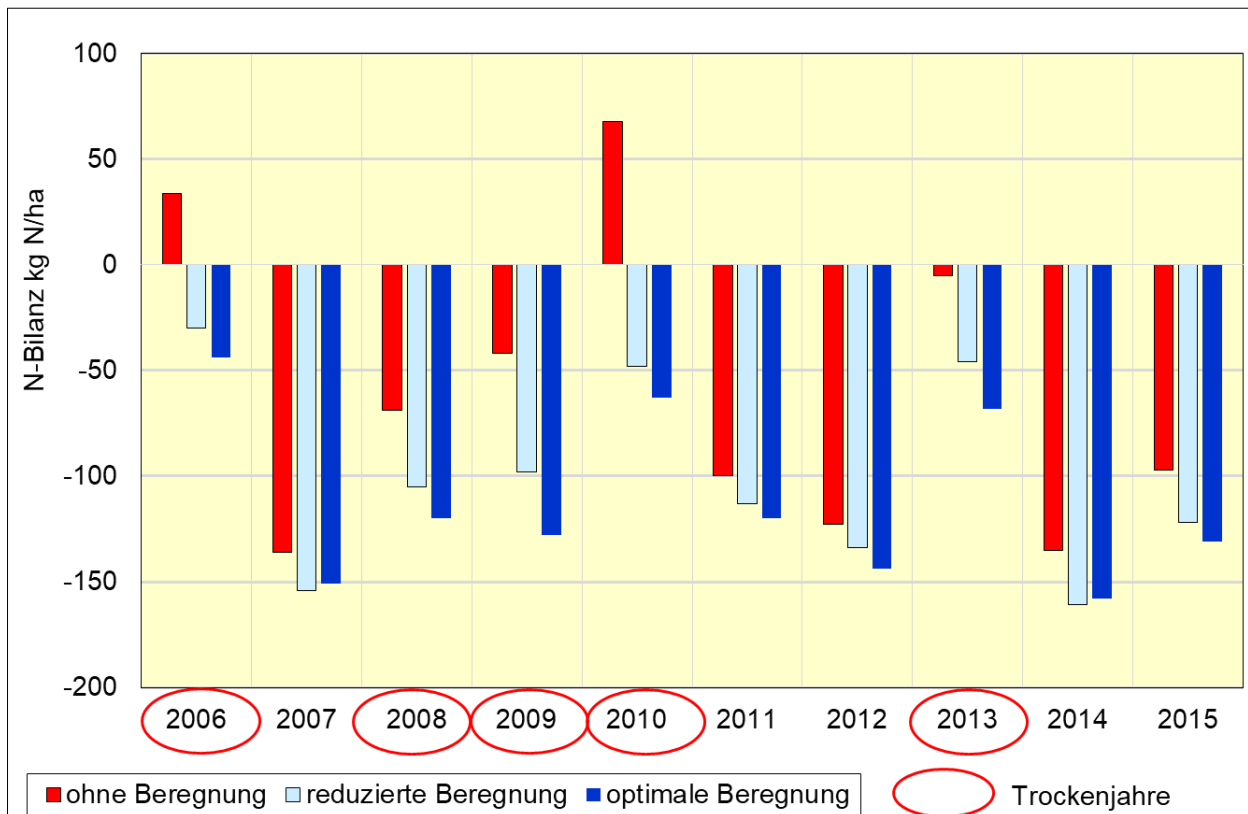
In der jüngeren Versuchsserie von 2006 bis 2015 wurden bei Speisekartoffeln ähnliche Auswirkungen der Beregnung festgestellt (Abbildung 10-4). Auch in diesen Versuchen können fünf von zehn Jahren als Trockenjahre für Kartoffeln identifiziert werden. Die Mehrererträge waren hier mit Beregnung gegenüber den unberegneten Varianten besonders hoch (mehr als 140 dt/ha), was trotz überdurchschnittlicher Beregnungsmengen (140-200 mm) mit einer guten Ausnutzung des Beregnungswassers einherging (100-200 kg Kartoffeln je mm Zusatzwasser).

Abbildung 10-4: Mehrerträge und Wasserausnutzung bei Speisekartoffeln, Einzeljahre (Standort Hamerstorf)



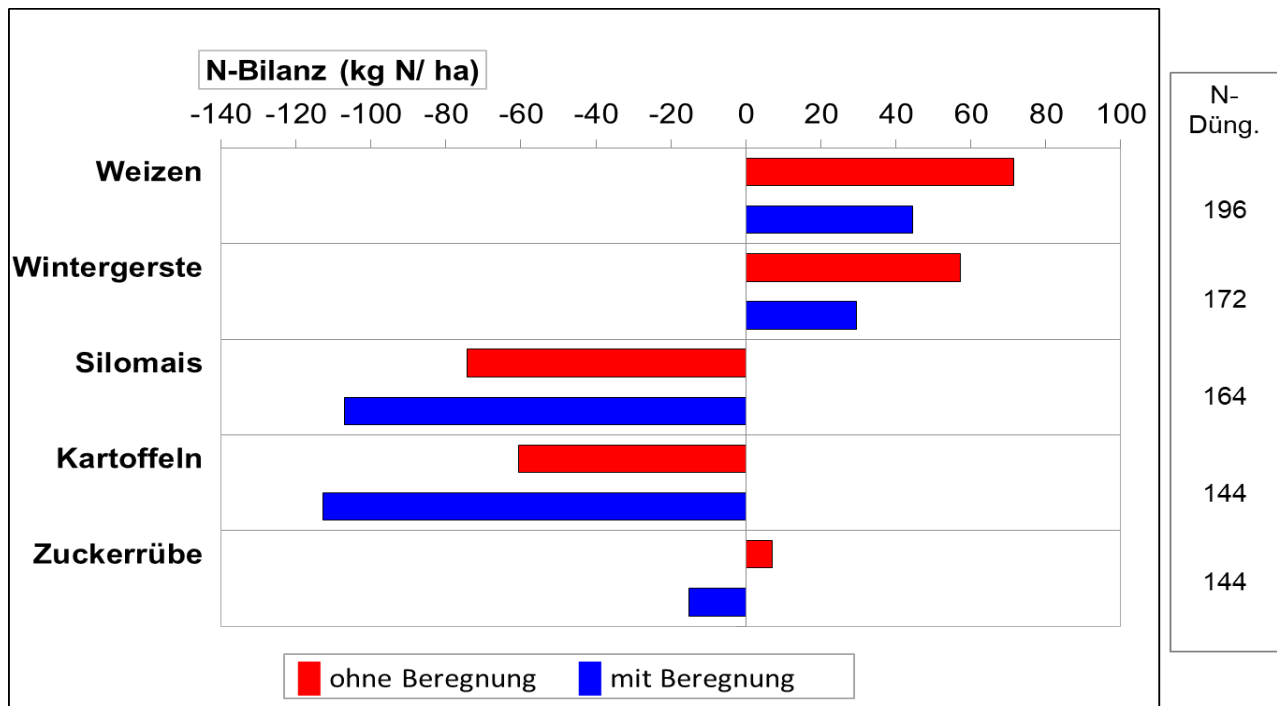
Quelle: Verändert nach Riedel und Fricke (2015).

Die N-Bilanzen wiesen dementsprechend große Unterschiede auf, wie Abbildung 10-5 zeigt. Sie waren mit Beregnung in den trockenen Jahren um 50 bis 130 kg N pro ha niedriger als ohne Beregnung.

Abbildung 10-5: N-Bilanzen Kartoffeln, Einzeljahre (Standort Hamerstorf)

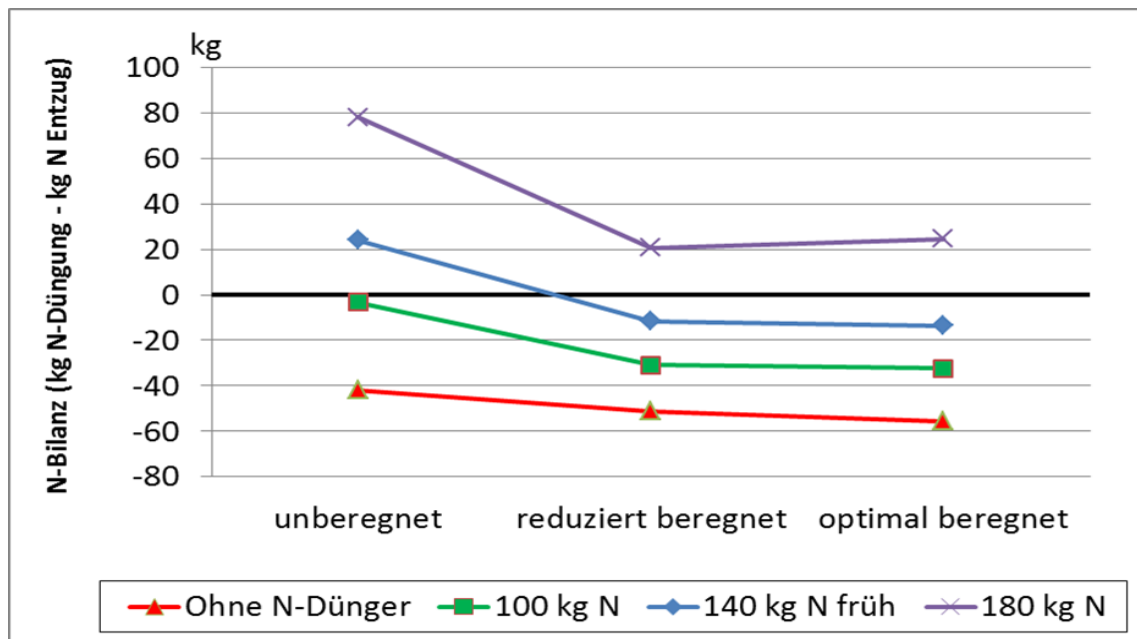
Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 10-6 zeigt für alle langjährig geprüften Kulturen (Winterweizen, Wintergerste, Silomais, Kartoffeln und Zuckerrübe) im Durchschnitt aller Versuchsjahre, dass mit Beregnung um etwa 20-50 kg N/ha niedrigere N-Salden beobachtet wurden als ohne die Gabe von Zusatzwasser.

Abbildung 10-6: N-Bilanzen mit und ohne Beregnung (Standort Hamerstorf, 2006-2016)

Quelle: Eigene Berechnungen.

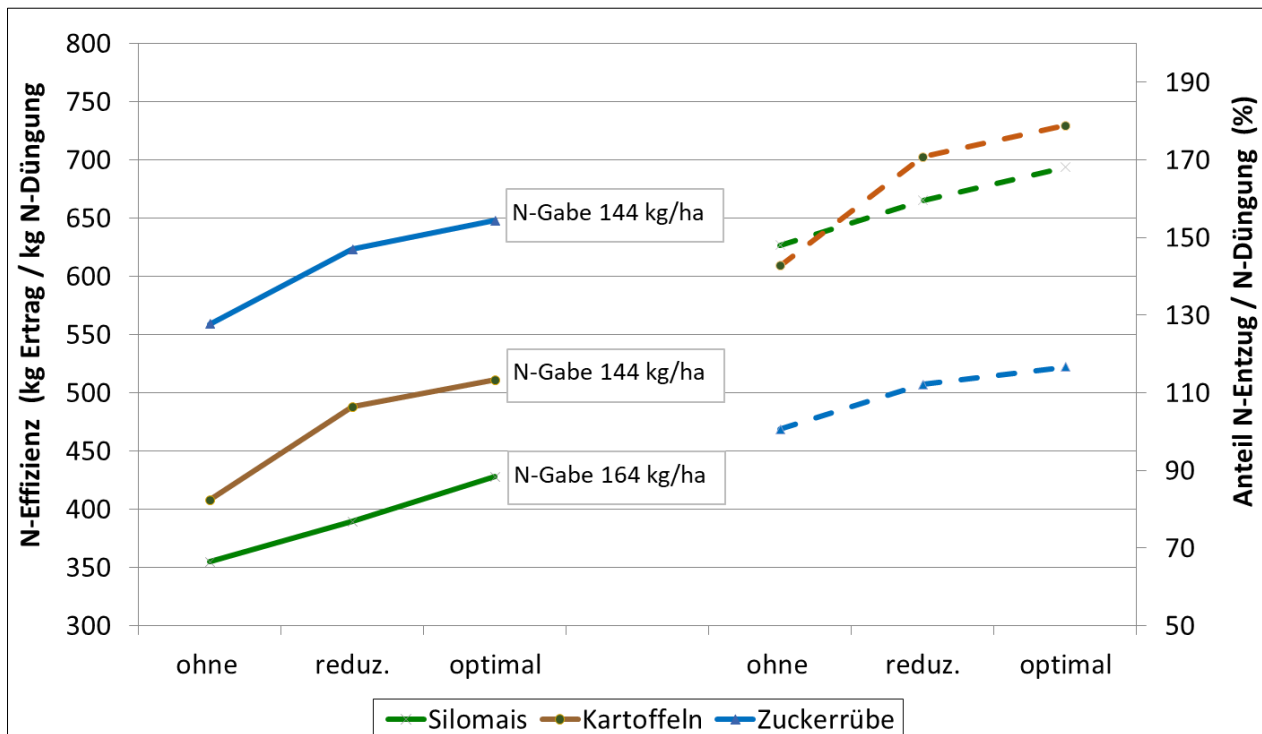
Am Beispiel der Braugerste im Jahr 2015 (trockener Frühsommer) wird in Abbildung 10-7 gezeigt, dass ein erhöhtes N-Angebot (140 kg N/ha), welches mit 40 kg N/ha über dem alten Sollwert an einen mit Beregnung zu erwartenden hohen Ertrag angepasst ist, nicht zu einem erhöhten N-Überschuss führte. Mit Beregnung lag der N-Saldo hier sogar etwas niedriger als bei geringerer N-Düngung (100 kg N/ha) ohne Beregnung. Zugleich konnte der Proteingrenzwert von 11 %, der einen für die Braugerste wichtigen Qualitätsparameter darstellt, eingehalten werden, was ohne Beregnung in keiner N-Düngungsstufe der Fall war.

Abbildung 10-7: N-Bilanzen von Sommerbraugerste (Standort Hamerstorf, 2015)

Quelle: Eigene Berechnungen.

Die gezeigten Versuchsergebnisse machen deutlich, dass wegen der höheren Ertragsstabilität, die mit Beregnung erreichbar ist, der Düngbedarf für das jeweils aktuelle Jahr berechenbarer wird. Bewässerung hilft also, das Risiko durch den Unsicherheitsfaktor "Wetter" über die Sicherung der Wasserzufuhr zu minimieren. Die Ertragserwartung wird mit höherer Wahrscheinlichkeit erfüllt und die gedüngten Nährstoffe besser genutzt.

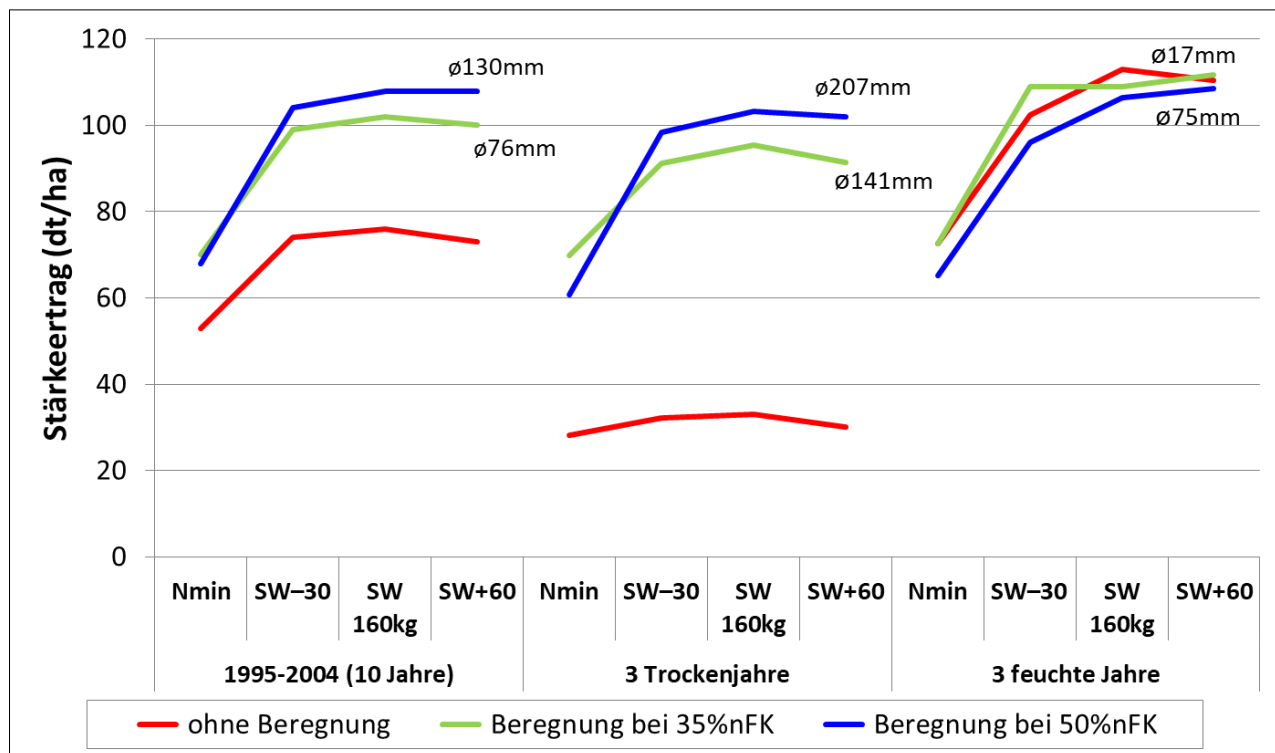
Die N-Effizienz kann auch als Quotient aus Ertrag und Menge des eingesetzten Stickstoffs bestimmt werden. Im Mittel der Versuchsjahre 2006 bis 2016 in Hamerstorf stieg sie bei den dargestellten Hackfrüchten mit zunehmender Beregnung deutlich an (Abbildung 10-8).

Abbildung 10-8: N-Düngungseffizienz (Standort Hamerstorf, 2006-2016)

Quelle: Eigene Berechnungen.

Die gestrichelten Kurven auf der rechten Seite der Grafik zeigen die Ausnutzung des Stickstoffdüngers. Werte über 100 % bedeuten, dass mehr Stickstoff entzogen worden ist als über die Düngung zugeführt wurde. Bei Zuckerrüben erhöhte sich die N-Ausnutzung mit Beregnung von 100 % auf 117 %. Kartoffeln und Silomais zeigten mit bis zu 180 % eine noch stärkere Verbesserung der Ausnutzung durch Beregnung. Diese Effekte beruhen auf einer gleichmäßigen Durchfeuchtung des Bodens, wodurch die Freisetzung pflanzenverfügbarer Nährstoffe angeregt und der bodenbürtige Stickstoff in erhöhtem Maße genutzt wird. Das zeigt auch der Beregnungsversuch mit Stärkekartoffeln, bei dem zusätzlich eine Staffelung der N-Düngung integriert war (Abbildung 10-9). Bei fehlender N-Düngung konnte der Ertrag durch Beregnung besonders in Trockenjahren deutlich gesteigert werden.

Abbildung 10-9: N-Düngung und Beregnung in Kartoffeln, Stärkeertrag (Standort Nienwohlde, 1995-2004)



Quelle: Eigene Berechnungen.

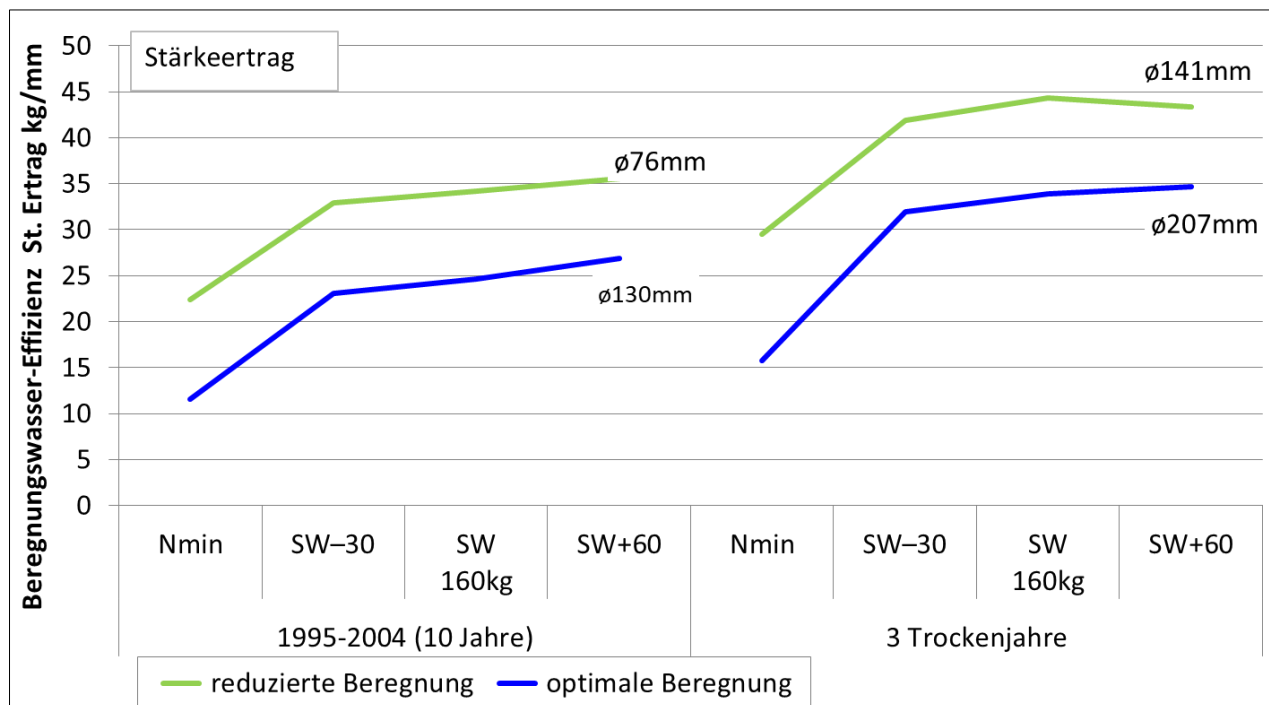
Die Förderung der Mineralisation organisch gebundener Nährstoffe durch Bewässerung ist auch bei der Umsetzung von organischen Düngern wichtig. Dies ist besonders für Betriebe mit einem hohen Einsatz an Wirtschaftsdüngern bedeutsam. Nur dann, wenn ein möglichst hoher Anteil der enthaltenen Nährstoffe für die Ertragsbildung der Kulturen nutzbar ist, kann der nach der neuen Düngeverordnung maximal erlaubte N-Überschuss von 50 kg N/ha eingehalten werden. Das gilt auch für den maximalen P-Saldo, der 10 kg Phosphat im gewogenen Mittel über sechs Jahre nicht überschreiten darf.

Für ökologisch wirtschaftende Betriebe bilden organische Dünger und der Humus des Bodens die Grundlage der Stickstoffversorgung. In der biologischen Landwirtschaft ist daher eine geregelte Wasserversorgung für eine gleichmäßige Freisetzung der Nährstoffe besonders wichtig, um Erträge und Produktqualitäten zu sichern.

Es wurde gezeigt, dass die Nährstoffeffizienz durch Bewässerung deutlich gesteigert werden kann. Umgekehrt lässt sich anhand der Versuchsergebnisse auch feststellen, dass eine bedarfsgerechte N-Düngung dazu beiträgt, die Wassereffizienz zu verbessern. Die Abbildungen 10-9 und 10-10 veranschaulichen diesen Sachverhalt. Ohne N-Düngung lagen die Erträge bei Stärkekartoffeln auch mit Beregnung auf einem deutlich niedrigeren Niveau als mit N-Düngung, was eine geringe Ausnutzung des Bewässerungswassers zur Folge hatte. In der ersten Düngungsstufe, die

30 kg N/ha unterhalb des empfohlenen Sollwerts lag, stiegen die Erträge und damit auch die Wasserausnutzung deutlich an. Eine weitere Anhebung der N-Gabe um 30 kg N/ha bis auf den Sollwert führte nochmals zu einer leichten Steigerung der Erträge und der Wassereffizienz. Bei einer überhöhten N-Düngung blieben die Erträge jedoch auf gleichem Niveau stehen oder sanken bei schlechter Wasserversorgung sogar ab.

Abbildung 10-10: Beregnungswasser-Effizienz bei unterschiedlicher N-Düngung bei Kartoffeln (Standort Nienwohlde, 1994-2004)



Quelle: Eigene Berechnungen.

Die positive Auswirkung der Beregnung auf die Nährstoffausnutzung lässt sich nicht nur rechnerisch sondern auch mittels Messung der Nmin-Gehalte im Boden belegen (Fricke, 2014). Die Herbst-Nmin-Werte nach Kartoffeln in den vier trockensten der zehn Versuchsjahre in Nienwohlde lagen in den beregneten Varianten zwischen 30 und 60 kg N/ha niedriger als ohne Beregnung. Damit ist auch die Menge des aus dem Oberboden in tiefere Schichten verlagerten Stickstoffs geringer. Der Nachweis erfolgte durch Tiefenbohrungen bis in zwölf Meter Tiefe. Es wurden jeweils vier Bohrungen auf den langjährig unberegneten und vier Bohrungen auf den langjährig beregneten Parzellen vorgenommen. Bei einer angenommenen Sickerwasserbildung von ca. 150-200 mm/Jahr ergibt sich auf dem Sandstandort eine jährliche Verlagerungstiefe von etwa 2 m. Somit ist in etwa der Verlagerungshorizont der letzten sechs Jahre erfasst worden. Im Mittel der vier Bohrungen befanden sich im gesamten Profil unter den unberegneten Parzellen 168 kg Nitrat-N/ha, während es unter den beregneten nur 128 kg waren.

10.4 Fazit

Die geringe Ertragssicherheit ist an Standorten mit niedriger Wasserspeicherkapazität des Bodens ein Problem bei der Realisierung einer hohen Nährstoffeffizienz. In feuchten Jahren können gute Ernten mit hohen Nährstoffentzügen erzielt werden, während in trockenen Jahren durch Mindererträge hohe Reststickstoffmengen im Boden zurückbleiben.

Der größte Nutzen der Bewässerung liegt daher in der wesentlich verbesserten Ertragssicherheit, weil die Ertragsbildung der angebauten Kulturen durch die gezielte Wasserzufuhr unabhängiger von den hohen jährlichen Schwankungen der Witterung ist. Außerdem werden im Durchschnitt der Jahre höhere Erträge erzielt. Dadurch wird die Ausnutzung der Nährstoffe besser und berechenbarer. Nährstoffüberschüsse und Restnitrat im Boden können somit durch Bewässerung verringert und die Sickerwasserqualität verbessert werden.

Eine pflanzenbedarfsgerechte Düngung kann die Wassereffizienz verbessern, wenn ein höherer Ertrag je mm des zur Verfügung stehenden Wassers erzielt wird. Dadurch wird der häufig knappe Faktor Wasser besser genutzt.

Literatur

Düngeverordnung vom 26. Mai 2017, Bundesgesetzblatt I S. 1305, 1. Juni 2017

Fricke E (2007) Beregnung – teuer aber lohnend, Kartoffelbau H. 3/2007, S. 100-103, Th. Mann Verlag, Gelsenkirchen

Fricke E (2008) Mit Beregnung das Ertragsrisiko senken, top agrar H. 12, S. 84-87, Landwirtschaftsverlag, Münster

Fricke E (2014) Auswirkungen von Wasserentnahme und Bewässerung auf die Umwelt in "Bewässerung in der Landwirtschaft" S. 127-130, Erling Verlag

Grocholl J, Riedel A (2014) Wassersparende Anbausysteme im Klimawandel in "KLIMZUG, Land- und Ernährungswirtschaft im Klimawandel Band 8", S. 75-92, Oekom-Verlag, München

Loock A (2013) Perspektiven der Zuckerrübenzüchtung, Vortrag DLG-Pflanzenbautagung 2013 in Göttingen, <http://www.dlg.org/pflanzenbautagung2013.html>, Loock.pdf.

Renger M, Bohne K, Facklam M, Harrach T, Riek W, Schäfer W, Wessolek G, Zacharias S (2009) Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte in „Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis“, S. 5-51, Reihe Bodenökologie und Bodengenese Heft 40, Technische Universität Berlin

- Riedel A (2014) Wassereffizienz verschiedener Arten und Sorten in „Wasser sparen im Ackerbau, Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung – Forschungsergebnisse zu Anpassungsstrategien der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg an den Klimawandel“, Teil 4, S. 7-22, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen, <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/23395.html>
- Riedel A, Fricke E (2015) Optimaler Einsatz der Feldberegnung, Kartoffelbau H. 5/2015, S. 35-39, DLG AgroFood Verlag, Groß-Umstadt

11 Betriebswirtschaftliche Eckdaten zur landwirtschaftlichen Bewässerung

Dr.-Ing. Norbert Fröba und Till Belau

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.

11.1 Datenherkunft und -verfügbarkeit

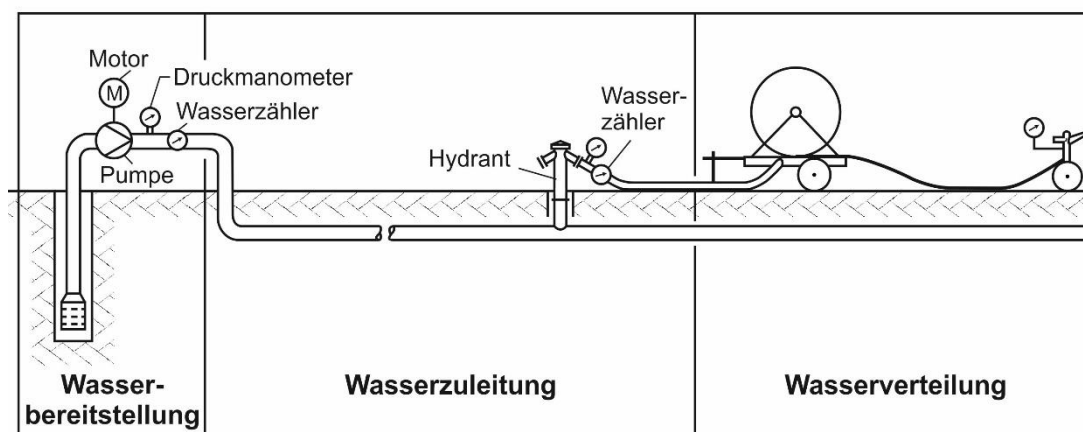
Die betriebs- und arbeitswirtschaftlichen Daten, auf die sich der folgende Beitrag stützt, wurden durch eine Arbeitsgruppe mit ehrenamtlichen Experten aus den wichtigsten „Bewässerungsregionen“ Deutschlands zusammengestellt. Auf der Basis von Arbeitszeitmessungen in Praxisbetrieben wurde der Arbeitszeitbedarf für die im Zusammenhang mit der Bewässerung anfallenden Arbeiten ermittelt.

Die Daten sind einerseits in der KTBL-Datensammlung Feldbewässerung (KTBL Hrsg., 2013) zusammengefasst und stehen andererseits in den kostenfreien KTBL-Online-Anwendungen „MAKOST“ (Maschinenkostenkalkulation) und „Feldarbeitsrechner“ (Daten zum Arbeitszeitbedarf und Maschinenkosten) zur Verfügung. Den Online-Anwendungen liegen jeweils aktualisierte Daten zu Grunde.

11.2 Für die Bewässerung nötige Investitionen

Abbildung 11-1 zeigt die drei Hauptelemente der landwirtschaftlichen Bewässerung. Die für die Wasserbereitstellung und die Wasserzuleitung benötigten Investitionen hängen dabei sehr stark von den lokalen Bedingungen ab.

Abbildung 11-1: Hauptelemente der landwirtschaftlichen Bewässerung



Quelle: Sourell (2007), verändert.

Wasserbereitstellung und Wasserzuleitung

Die Wasserbereitstellung kann aus Oberflächengewässern oder aus Brunnen erfolgen. Bei Entnahmetiefen bis 20 m spricht man von Flachbrunnen bei größeren Tiefen von Tiefbrunnen.

Für die Entnahme aus Oberflächengewässern werden Saugpumpen benötigt. Der Antrieb erfolgt über Zapfwelle oder festverbundene Elektro- oder Dieselmotoren. Für die Pumpen wird eine Lebensdauer von 15 Jahren und eine Gesamtlaufzeit von 15.000 h angenommen. Bei einer Förderleistung von 50 m³/h und 12 bar Ausgangsdruck liegt der Anschaffungspreis für den Antrieb mit Elektromotor etwa bei 7.000 € und mit Dieselmotor bei etwa 17.000 €. Pumpen für den Antrieb mittels Zapfwelle sind wesentlich günstiger. Für Pumpen mit einer Förderleistung von 100 m³/h sind etwa 50 % höhere Preise anzusetzen.

Soll Wasser aus Brunnen entnommen werden, ist für die Bauarbeiten (einschl. Baustelleneinrichtung und Brunnenhaus) mit den in Tabelle 11-1 genannten Kosten zu rechnen. In der Tabelle sind auch die Preise für eine Stromzuführung angegeben. Für die Planung, Antragstellung und Genehmigung sind Kosten von 500 bis über 50.000 € anzusetzen. Die Kosten sind abhängig von der geplanten Entnahmemenge, der Lage (z. B. Naturschutz- oder Flora-Fauna-Habitat-Gebiet) und länderspezifischen Auflagen.

Tabelle 11-1: Kosten für Brunnenbau und Wasserzuführung

Gewerk	Preis €	Nutzung a	Reparaturkosten €/a
Brunnenbau			
20-m-Flachbrunnen	10.500	30	53
40-m-Tiefbrunnen	23.500	30	118
80-m-Tiefbrunnen	45.000	30	225
Stromzuführung 500 m			
Für Pumpen mit 50 m ³ /h	4.700	30	24
Für Pumpen mit 150 m ³ /h	11.000	30	55

Quelle: Eigene Berechnungen.

Neben den Kosten für den Brunnenbau sind hier auch noch Kosten für die Pumpen und das Zubehör zu berücksichtigen. Die Anschaffungspreise für Unterwasserpumpen mit Elektromotor liegen zwischen 6.500 (50 m³/h) und 15.000 € (150 m³/h). Bei den Bohrlochwellenpumpen (30 m Steigrohr) mit Zapfwellenantrieb liegen die Anschaffungspreise zwischen 7.500 und 13.000 €. Für Bohrlochwellenpumpen mit eigenem Dieselmotor ist mit Anschaffungspreisen von 24.000 bis 30.000 € zu rechnen. Die Frequenzumrichter für die Elektromotoren schlagen mit 7.000 bis 10.000 € zu Buche.

Bei den Zuleitungen sind die größten Kostenpunkte die Rohre und die Hydranten. Es wird eine Lebensdauer von 20 Jahren zu Grunde gelegt. Für die Rohre betragen die Kosten für Material und Verlegung 13 (DN 125) – 30 €/m (DN 200) und für die Hydranten 850 (DN 125) – 1.100 €/St. (DN 200). Dazu kommen noch die Kosten für T-Stücke, Flansche, Reduzierungen, Längenausgleich, Betonschächte, Entleerung, Widerlager usw., die je nach Bauteil und Größe zwischen 100 und 500 €/St liegen.

Wasserverteilung

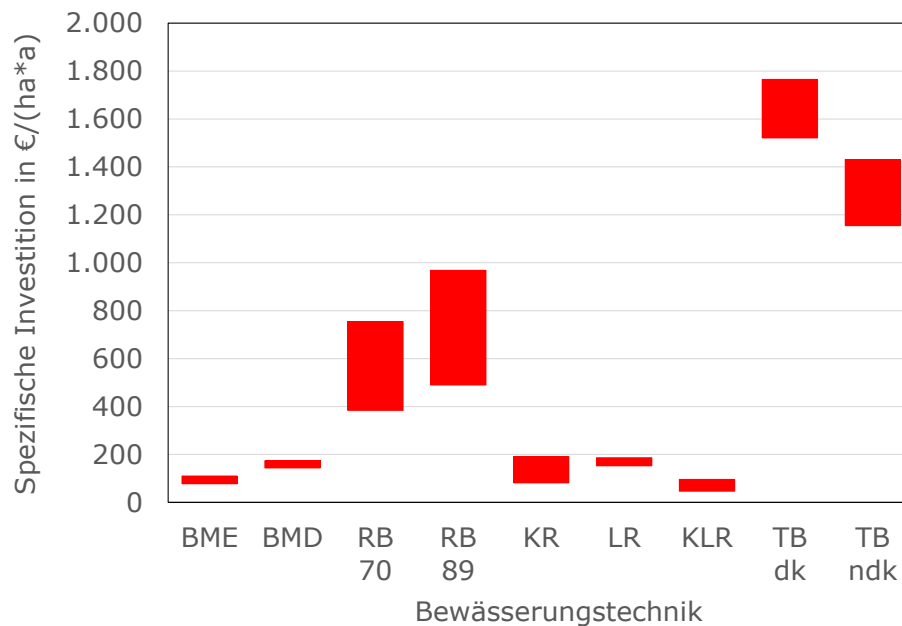
Auf mehr als 98 % der bewässerten Flächen erfolgt die Wasserverteilung mit Beregnungsmaschinen mit Einzelregnern. Die Anschaffungspreise für diese Maschinen sind in Tabelle 11-2 zusammengestellt. Angegeben sind zusätzlich die angenommene Lebensdauer und die beregenbare Fläche pro Jahr. Die beregenbare Fläche ist so gewählt, dass die Maschine zum richtigen Zeitpunkt für die nächste Wassergabe zur Verfügung steht. In der letzten Spalte sind die spezifischen Investitionen pro beregneter Fläche und Jahr dargestellt. Diese Größe erlaubt den Vergleich von Maschinen/Anlagen mit unterschiedlichen Lebensdauern. So beträgt beispielsweise die Lebensdauer von nichtdruckkompensierten Tropfschläuchen ein Jahr, und bei druckkompensierten zur mehrmaligen Auslegung drei Jahre. Dagegen werden für die Lebensdauer der Rohrberegnung 15 Jahre angenommen.

Tabelle 11-2: Kosten für Beregnungsmaschinen mit Einzelregner

Maschine							
Rohr- länge	Rohrdurch- messer	Durch- satz	Beregnungs- breite	Preis	Nutzung		Spezifische Investition
m	mm	m³/h	m	€	ha/a	a	€/ (ha*a)
200	63	20	44	11.000	10	12	92
350	75	30	58	17.000	15	12	94
400	100	48	66	23.000	25	12	78
500	110	60	72	30.000	31	12	81
500	125	73	82	37.500	37	12	84
600	120	69	80	40.000	35	12	95
600	125	73	82	49.000	37	12	110

Quelle: Eigene Berechnungen.

Abbildung 11-2 zeigt den spezifischen Investitionsbedarf für die verschiedenen Bewässerungstechniken. Die Spannweite der Werte resultiert aus verschiedenen Maschinen/Anlagengrößen.

Abbildung 11-2: Spezifische Investitionen für verschiedene Bewässerungstechniken

BME: Beregnungsmaschine mit Einzelregner, BMD: Beregnungsmaschine mit Düsenwagen, RB 70, RB 89: Rohrberegnung (Rohrdurchmesser 70 bzw. 89 mm), KR: Kreisberegnungsmaschine, LR: Linearberegnungsmaschine, KLR: Kombinierte Kreis-/ Linearberegnungsmaschine, TB dk: Tropfbewässerung mit druckkompensierten Schläuchen, TB ndk: Tropfbewässerung mit nichtdruckkompensierten Schläuchen

Quelle: Eigene Darstellung.

Die geringsten spezifischen Investitionen benötigen die Beregnungsmaschinen und die Kreis- und Linearberegnungsmaschinen mit 100 bis 200 €/ha*a). Für Rohrberegnungsanlagen liegen die spezifischen Investitionen zwischen 400 und 900 €/ha*a). Die höchsten spezifischen Investitionen von 1.000 bis 1.800 €/ha*a) fallen für die Tropfbewässerung an.

11.3 Arbeitserledigung

Bei den Maschinenkostenkalkulationen wird angenommen, dass mit der Maschine/Anlage nur eine Kultur pro Jahr bewässert wird. Werden mehrere Kulturen bewässert, sinken die fixen Maschinenkosten.

Beregnungsmaschinen

In Tabelle 11-3 sind der Arbeitszeitbedarf sowie die Lohn- und Maschinenkosten für eine Zusatzwassergabe von 25 mm beim Einsatz von Beregnungsmaschinen mit Einzelregnern für verschiedene Schlaggrößen zusammengestellt. Die Tätigkeit A beinhaltet hier den Transport zum und vom Feld, das Aufstellen und Versetzen sowie das Einschalten und die Funktionskontrolle. Die Tätigkeit B beinhaltet die eigentliche Wasserabgabe. Hierbei ist keine Arbeitszeit erforderlich.

Tabelle 11-3: Arbeitszeitbedarf, Lohn- und Maschinenkosten für eine Zusatzwassergabe von 25 mm beim Einsatz von Beregnungsmaschinen mit Einzelregnern für verschiedene Schlaggrößen

Maschine								Maschinenkosten	
Rohr- länge m	Rohr- durch- messer mm	Durch- satz m ³ /h	Bereg- nungs- breite m	Schlag- größe ha	Tätig- keit	Arbeits- zeit- bedarf AKh/ha	Lohn- kosten €/ha	fix €/ha	variabel €/ha
200	63	20	18	1	A	1,97	34,48	9,92	13,88
					B			24,67	5,00
350	75	30	54	5	A	0,35	6,12	1,75	2,61
					B			26,58	5,00
600	120	69	81	20	A	0,13	2,28	1,10	1,49
					B			25,20	5,00

A = Transport zum/vom Feld, Aufstellen/Versetzen, Einschalten, Funktionskontrolle

B = Bewässern

Quelle: Eigene Berechnungen.

Während die Kosten für die eigentliche Bewässerung keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Maschinen- und Schlaggröße aufweisen, variieren die Kosten für die Arbeiten in Tätigkeit A stark. So besteht für die kleine Maschine auf dem 1-ha-Schlag ein Arbeitszeitbedarf von 1,97 AKh/ha und für die große Maschine auf dem 20-ha-Schlag von nur 0,13 AKh/ha. Die Maschinenkosten schwanken etwas geringer.

Mit einem Düsenwagen steigen die Kosten für beide Tätigkeiten. Der höhere Arbeitszeitbedarf resultiert aus den zusätzlichen Zeiten für das Aus- und Einklappen des Düsenbalkens. Deswegen hat sich diese Technik nicht weiter verbreitet, obwohl die Wasserverteilung im Vergleich zum Einzelregner erheblich besser ist.

Rohrberegnung

Der größte Teil des Arbeitszeitbedarfs für die Rohrberegnung entfällt auf den Auf- und Abbau der Rohrberegnungsanlage. Dazu kommt noch der Zeitbedarf für das Betreiben der Rohrberegnung (Fahrten zum und vom Feld, ein-/ausschalten, Teilbreiten schalten, Funktionskontrolle). Der Zeitbedarf für das Auf- und Abbauen ist in erster Linie vom Strangabstand und danach von der Lagerung des benötigten Materials abhängig. Einen ähnlichen Einfluss hat der Rohrdurchmesser und damit verbunden das Gewicht der eingesetzten Bauteile. Die Schlaggröße spielt dagegen nur eine geringe Rolle.

Bei Einzellagerung (Anlagenelemente werden einzeln ins Lager geräumt und von dort entnommen) der Bauteile (Rohrdurchmesser 70 mm) und einem Strangabstand von 12 m, werden für den Aufbau etwa 4,1 bis 4,4 AKh/ha benötigt. Bei Lagerung der Bauteile auf Wagen, sind nur noch 2,9 bis 3,1 AKh/ha erforderlich. Wird eine Beregnung mit 24 m Strangabstand aufgebaut, liegt der Zeitbedarf bei der Einzellagerung zwischen 2,3 und 2,6 AKh/ha und für die Wagenlagerung zwischen 1,6 und 1,8 AKh/ha. Für den Aufbau einer Rohrberegnungsanlage mit 89 mm Rohrdurchmesser ist der Arbeitszeitbedarf etwa 15 bis 25 % höher. Der Zeitbedarf für das Abbauen ist jeweils etwa 5 % niedriger als beim Aufbau.

Der Zeitbedarf für das Betreiben liegt für eine Gabe bei 0,16 AKh/ha für die 5-ha-Anlage, 0,24 AKh/ha für die 2-ha-Anlage und 0,32 AKh/ha für die 1-ha-Anlage. Der Strangabstand hat dabei keinen Einfluss auf den Arbeitszeitbedarf.

Beim Aufbau der Anlagen werden die Maschinenkosten für die benötigten Anlagenbauteile berücksichtigt. Für 12 m Strangabstand und einen Rohrdurchmesser von 70 mm sind Maschinenkosten (fix + variabel) von 950 €/ha bis 1.050 €/ha anzusetzen. Bei einem Strangabstand von 24 m sind die Kosten etwa 400 €/ha niedriger. Werden Rohre mit einem Durchmesser von 89 mm verwendet, sind die Kosten bei 12 m Strangabstand etwa 250 bis 300 €/ha und bei 24 m Strangabstand etwa 150 bis 180 €/ha höher. Die Maschinenkosten für die benötigten Fahrzeuge in Höhe von etwa 20 €/ha (Einzellagerung und 12 m Strangabstand) und 10 €/ha (Wagenlagerung und 24 m Strangabstand) sind in den Maschinenkosten für den Aufbau enthalten. Sie sind aber beim Abbau zu berücksichtigen.

Kreis- und Linearberegnung

Der Arbeitszeitbedarf sowie die Lohn- und Maschinenkosten für die Bewässerung mit Kreis- und Linearberegnungsmaschinen werden im Folgenden für eine Zusatzwassergabe von 20 mm angegeben.

Den geringsten Arbeitszeitbedarf aller Bewässerungsmaschinen/-anlagen haben Kreisberegnungsanlagen mit 0,01 ($\varnothing$ 1.000 m) bis 0,04 AKh/ha ($\varnothing$ 400 m). Dies beinhaltet die Fahrt zur Beregnungsanlage und zurück, das Ein- und Ausschalten sowie die Funktionskontrolle. Die Maschinenkosten (fix + variabel) für den Pick-up liegen unter 1 €/ha. Die Maschinenkosten für die Wasserausbringung (fix + variabel) liegen zwischen 35 ($\varnothing$ 1.000 m) und 60 €/ha ($\varnothing$ 400 m).

Im Arbeitszeitbedarf für die Bewässerung mit Linearberegnungsmaschinen (Schlaglänge jeweils 1.100 m) sind die Fahrt zur Beregnungsanlage und zurück, das Ein- und Ausschalten, die Funktionskontrolle und das Umlegen des Anschlussschlauches. Die Spanne reicht von 0,10 (Maschinenlänge 500 m) bis 0,22 AKh/ha (Maschinenlänge 200 m). Die Maschinenkosten für die Wasserausbringung (fix + variabel) liegen zwischen 50 (500 m) und 63 €/ha (200 m).

Tropfbewässerung

Der größte Arbeitszeitbedarf und die höchsten Maschinenkosten treten bei der Tropfbewässerung auf. Es sind folgende Arbeiten zu berücksichtigen:

- A: Transport des benötigten Materials zum Feld
- B: Auslegen der Schläuche (Querschläuche und Tropfschläuche)
- C: Anschließen der Tropfschläuche an die Querschläuche und verschließen der freien Enden der Tropfschläuche
- D: Betreiben (ein-/ausschalten, Teilbreiten schalten, Funktionskontrolle)
- E: Bewässern
- F: Entwässern und Verbindungen lösen
- G: Schläuche und Kopfstation aufnehmen
- H: Transport des Materials zum Hof

Die Arbeiten können teilweise kombiniert werden und das Verlegen der Schläuche kann zusammen mit der Bestellung oder dem Auslegen von Folie erfolgen.

Die Schläuche können mit unterschiedlichsten Strangabständen im oder auf dem Boden abgelegt werden. Bei nicht druckkompensierten Schläuchen ist die Tropfschlauchlänge auf etwa 500 m begrenzt. Es fallen zusätzliche Arbeiten durch die zusätzlichen Anschlüsse an der mittigen Einspeisung und das Verschließen der zusätzlichen freien Enden an. Das Verschließen der freien Enden seinerseits kann durch Verknoten oder durch Einsatz spezieller Endstücke realisiert werden.

Aus diesen Gründen variieren die Kosten für die Arbeitserledigung (Lohnkosten + Maschinenkosten) bei der Tropfbewässerung in Abhängigkeit von den Randbedingungen um mehrere 100 %. In Tabelle 11-4 sind die Lohn- und Maschinenkosten am Beispiel einer Tropfbewässerungsanlage mit druckkompensierten Schläuchen auf einem 5-ha-Schlag mit einem Strangabstand von 75 cm bei einer Feld-Hof-Entfernung von 2 km zusammengestellt. Die Kosten für die Anlagenelemente sind bei der Arbeit „D: Bewässerung“ angegeben. Im Beispiel wird der Anteil der Kosten für eine Zusatzwassergabe von 3,5 mm (70 mm Zusatzwasser/a) ausgewiesen.

Tabelle 11-4: Lohn- und Maschinenkosten für eine Tropfbewässerungsanlage mit druckkompensierten Schläuchen auf einem 5-ha-Schlag mit einem Strangabstand von 75 cm bei einer Feld-Hof-Entfernung von 2 km. Zusatzwassergabe 3,5 mm bei einer Jahreswassergabe von 70 mm/a

Tätigkeit	Arbeitszeitbedarf AKh/ha	Lohnkosten €/ha	Maschinenkosten	
			fix €/ha	variabel €/ha
A	0,41	3,48	2,09	2,91
B	8,96	116,48	29,52	33,07
C	2,30	19,55	1,09	0,75
D	–	–	70,33	4,76
E	0,95	16,63	2,72	0,51
F	1,20	10,20	0,36	0,25
G	10,62	138,06	35,85	33,15
H	0,65	5,23	3,32	4,80

A: Transport des benötigten Materials zum Feld, B: Auslegen der Schläuche (Querschläuche und Tropfschläuche), C: Anschließen der Tropfschläuche an die Querschläuche und verschließen der freien Enden der Tropfschläuche, D: Betreiben (ein-/ausschalten, Teilbreiten schalten, Funktionskontrolle), E: Bewässern, F: Entwässern und Verbindungen lösen, G: Schläuche und Kopfstation aufnehmen, H: Transport des Materials zum Hof

Quelle: Eigene Berechnungen.

Jahreskosten

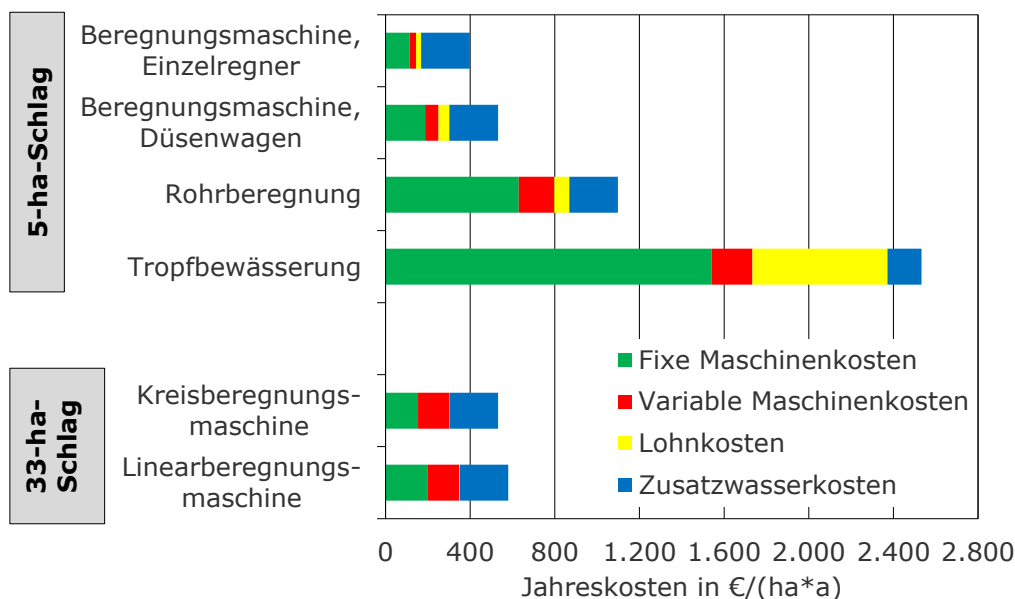
Die Jahreskosten für die Bewässerung beinhalten die Lohnkosten, die fixen und variablen Maschinenkosten sowie die Kosten für das Bewässerungswasser (Zusatzwasser). Da die Kosten für eine individuelle Wasserbereitstellung und -zuleitung sehr unterschiedlich sein können (siehe oben), wird bei den folgenden Betrachtungen eine Wasserabnahme aus dem Netz eines Bewässerungsverbandes zum Preis von 0,23 €/m³ angenommen.

Abbildung 11-3 zeigt die Jahreskosten für verschiedene Bewässerungsmaschinen/-anlagen. Für die Beregnungsmaschine mit Einzelregner oder Düsenwagen, die Rohrberegnung und die Tropfbewässerung sind die Jahreskosten für die Bewässerung eines 5-ha-Schlages mit einer Hof-Feld-Entfernung von 2 km und einer Gesamtzusatzwassergabe von 100 mm (70 mm für Tropfbewässerung). Bei der Bewässerungsmaschine mit Einzelregner erfolgen vier Gaben zu 25 mm, bei der Bewässerungsmaschine mit Düsenwagen und der Rohrberegnung fünf Gaben mit 20 mm sowie bei der Tropfbewässerung 20 Gaben zu 3,5 mm.

Die Jahreskosten für die Kreis- und Linearberegnung sind für die Bewässerung auf 33 ha großen Schlägen dargestellt. Bei der Kreisberegnung wird mit dem Einsatz von Endregnern mit 25 m Wurfweite ein runder Schlag mit einem Radius von 325 m bewässert. Bei der Linearberegnungs-

anlage ist der Schlag 1.100 m lang und 300 m breit. Die Schläge sind jeweils 2 km vom Hof entfernt und es werden pro Jahr fünf Gaben zu 20 mm ausgebracht.

Abbildung 11-3: Jahreskosten für die Bewässerung mit verschiedenen Techniken



Quelle: Eigene Darstellung.

Die geringsten Jahreskosten fallen bei der Bewässerung mit der Beregnungsmaschine und der Kreis- und Linearberegnungsanlage an. Bei den Kreis- und Linearberegnungsanlagen werden häufig eigene Brunnen bei der Anlage genutzt und dadurch die Zusatzwasserkosten gesenkt. Weiterhin sind die Jahreskosten für größere Kreisberegnungsanlagen mit 500 m Radius etwa 50 €/ha*a niedriger.

11.4 Fazit

Die Kosten für die Wasserbereitstellung und -zuleitung hängen sehr stark von den örtlichen Bedingungen ab. In vielen Regionen wird die Bereitstellung und Zuleitung des Beregnungswassers von Beregnungsverbänden übernommen. Die Zusatzwasserkosten haben, Tropfbewässerung ausgenommen, einen großen Anteil an den Bewässerungskosten.

Die spezifischen Investitionen variieren nach Bewässerungssystem und Anlagen-/Maschinengröße stark. Kann die Bewässerungstechnik zu verschiedenen Kulturen mit unterschiedlichen Bewässerungszeiten eingesetzt werden, so sinken die spezifischen Kosten erheblich.

Bei der Tropfbewässerung erfordern der Auf- und Abbau und die Funktionskontrolle einen hohen Zeitaufwand. Ebenso liegen die Maschinen-/Anlagenkosten hier am höchsten. Die Spannweite der Kosten beträgt hier in Abhängigkeit der vielen Einsatzfaktoren mehrere 100 %.

Die geringsten Jahreskosten fallen beim Einsatz von Berechnungsmaschinen mit Einzelregner sowie bei Kreis- und Linearberechnungsanlagen an.

Literatur

KTBL (Hrsg.) 2013 KTBL-Datensammlung Feldbewässerung. KTBL, Darmstadt.

Sourell H (2007) Wasser marsch! – Technik und Kosten der Feldbewässerung. Agritechnica Forum 3, 13.11.2007, Hannover

12 Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung

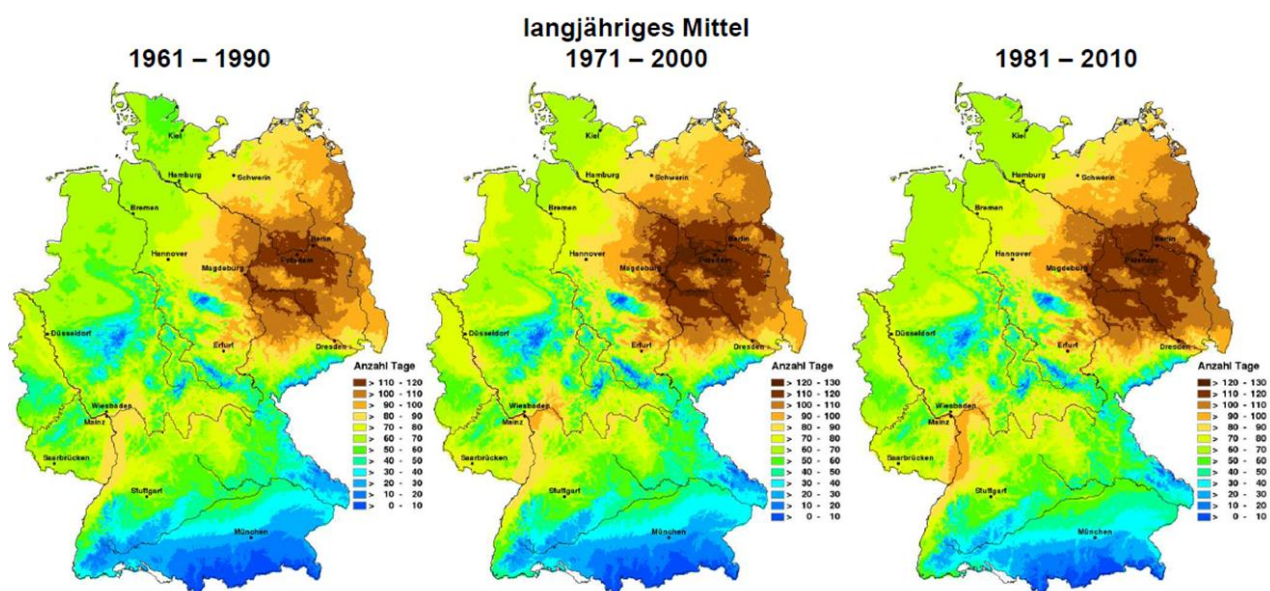
Dr. Thomas de Witte

Thünen-Institut für Betriebswirtschaft

12.1 Einleitung

Kein Wirtschaftsbereich hängt so stark vom Niederschlag ab wie der Ackerbau. Während der letzten 50 Jahre haben im Nordosten Deutschlands die Trockenperioden deutlich zugenommen (vgl. Abbildung 12-1). Weiterhin haben sich die von Trockenheit betroffenen Gebiete ausgedehnt. Am stärksten ist der Nordosten Deutschlands von Trockenperioden betroffen. Wenn der Wassergehalt im Boden unter 50 % der nutzbaren Feldkapazität sinkt, ist von Trockenstress für die Pflanzen auszugehen. Im östlichen Niedersachsen, nördlichen Sachsen-Anhalt sowie in Brandenburg liegt die Wasserversorgung der Böden im 30-jährigen Mittel an mehr als 100 Tagen unterhalb dieses Schwellenwertes. In einigen Regionen Brandenburgs werden sogar an mehr als 130 Tagen weniger als 50 % der nutzbaren Feldkapazität erreicht. Somit drängt sich in diesen Regionen die Frage auf, ob Investitionen in die Bewässerung rentabel sind.

Abbildung 12-1: Regionales Auftreten der Anzahl Tage mit Bodenfeuchten <50 % nFK (Kultur Winterweizen, leichter Boden)



Quelle: DWD-Klimaatlas (2015).

Nachfolgend wird diese Frage am Beispiel der Region Altmark in Sachsen-Anhalt analysiert. Dabei werden die aus Sicht eines landwirtschaftlichen Investors relevanten Fragen für die Investition in die Feldbewässerung adressiert.

- (1) Was sind die Kernunterschiede verschiedener Bewässerungstechnologien und wie wirken sich die Unterschiede auf die Kosten der Bewässerung aus?
- (2) Welche Mehrerträge sind durch die Bewässerung zu erwarten?
- (3) Welche Kulturen sollten bewässert werden?
- (4) Wie stark sollten die jeweiligen Kulturen bewässert werden?

In Kapitel 12.2 werden zunächst die Standortparameter sowie die wesentlichen Annahmen für die Kalkulationen beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 12.3 die Kernunterschiede verschiedener Bewässerungsverfahren erklärt und die daraus resultierenden Kostenunterschiede analysiert. Darauf aufbauend wird exemplarisch für den Standort Altmark die Wirtschaftlichkeit der Bewässerung verschiedener Kulturen verglichen und die optimale Bewässerungsmenge abgeleitet. Im Fazit werden Schlussfolgerungen aus den Kalkulationen gezogen.

12.2 Standortbeschreibung und Annahmen für die Kalkulationen

Die Altmark liegt im Nordwesten des Landes Sachsen-Anhalt und grenzt an das Bewässerungsgebiet in Südost-Niedersachsen an. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge reichen von 550 bis 600 mm. Die überwiegend sandigen und lehmigen Böden verfügen über 20 bis 40 Bodenpunkte. Die durchschnittliche Feldgröße beträgt etwa 30 ha.

In Tabelle 12-1 sind die direkt- und arbeitserledigungskostenfreien Leistungen der in der Region angebauten Kulturen ohne Bewässerung dargestellt. Die Ertragsannahmen wurden hierfür aus der Regionalstatistik abgeleitet. Das Ertragsniveau ist aufgrund der beschränkten Wasserverfügbarkeit mit 33 dt Raps sowie 61 dt Weizen vergleichsweise gering.

Für die Preisannahmen wurde von einem Weizenpreis von 16 €/dt ausgegangen. Die übrigen Preise wurden anhand der historischen Preisrelationen ermittelt. Die Grunddüngung wurde nach Entzug und die Stickstoffdüngung nach der Sollwertmethode kalkuliert. Als Nährstoffpreise wurden die Mittelwerte der Jahre 2014 bis 2016 unterstellt (AMI 2017). Der Pflanzenschutzmittelaufwand wurde aus Mohr und Jerchel (2017) übernommen.

Tabelle 12-1: Rentabilität unterschiedlicher Kulturen in der Altmark

		Raps	Weizen	Roggen	Wintergerste	Rüben	Braugerste	Kartoffeln
Ertrag	dt/ha	33	61	64	60	620	40	430
Preis	€/dt	32	16	14	15	3	18	15
Markterlöse	€/ha	1.056	976	896	870	2.108	720	6.450
Saatgut	€/ha	70	83	78	72	230	72	823
Dünger	€/ha	175	178	160	158	253	109	331
PSM	€/ha	180	145	175	175	315	70	310
Direktkostenfreie Leistungen	€/ha	631	570	483	465	1.310	469	4.986
Arbeitsenergiekosten	€/ha	484	519	513	533	566	491	1.018
Direkt- und AEK-freie Leistungen	€/ha	147	51	-30	-68	744	-22	3.968

Quelle: Eigene Annahmen.

Für die nachfolgenden Kalkulationen der Kosten unterschiedlicher Bewässerungsverfahren wird von einem 72 ha Schlag mit einer Länge von 1.200 m und einer Breite von 600 m ausgegangen. Es wird angenommen, dass aufgrund eines hydrologischen Gutachtens eine Wasserentnahme von maximal 80 mm/ha von der unteren Wasserbehörde genehmigt ist. Diese Annahme deckt sich mit üblicherweise zulässigen Wasserentnahmemengen im benachbarten Bewässerungsgebiet Südniedersachsen (Fricke 2017).

12.3 Kosten unterschiedlicher Bewässerungstechnologien

Nachdem zuvor die Ausgangssituation der Region erläutert wurde, werden nachfolgend die technologischen Unterschiede wichtiger Bewässerungsverfahren beschrieben sowie die Kosten der Bewässerungsverfahren kalkuliert. Für die Kalkulation wird von dem im vorherigen Kapitel beschriebenen 72 ha Schlag ausgegangen. Folgende Verfahren werden für den Vergleich berücksichtigt¹:

- (1) Mobile Beregnungsmaschinen mit Düsenwagen
- (2) Kreisberegnung als teilmobile Beregnungsmaschine
- (3) Tropfbewässerung als Mikrobewässerung

¹ Grundsätzlich gibt es weitere Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen, wie Düsenwagen bei mobilen Beregnungsmaschinen oder die Linearberegnung als teilmobile Beregnungsverfahren. Mit dem Ziel, die Kernunterschiede der Technologien darzustellen, beschränkt sich die Analyse aber auf die genannten Verfahren.

Für die Kalkulation der Kosten wird jedes Verfahren als Gesamtinvestition betrachtet, das aus einem Brunnen, dem Leitungssystem für die Wasserzuleitung sowie den Maschinen für die Wasserverteilung besteht. Dies ist erforderlich, weil in der Wasserzuleitung erhebliche Unterschiede zwischen den Bewässerungsverfahren bestehen. Der Investitionsbedarf für die Maschinen und die erforderliche Infrastruktur ist aus KTBL (2013) abgeleitet und in Abbildung 12-2 dargestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Verfahren und die erforderlichen Investitionen kurz beschrieben.

Mobile Beregnungsmaschinen

Bezüglich der technischen Eigenschaften und des Investitionsbedarfs sind folgende Eigenschaften von mobilen Beregnungsmaschinen zu nennen:

- Die Schlauchlänge von mobilen Bewässerungsmaschinen ist auf etwa 900 m begrenzt, sodass der Schlag über die 600 m lange Querseite bewässert werden muss.
- Die mobilen Beregnungsmaschinen benötigen einen hohen Wasserdruck im System, um das Wasser 80 m weit werfen zu können. Hierfür ist ein Wasserdruck von etwa 7 bar in der Beregnungsmaschine bzw. 9 bar am Brunnen erforderlich. Der hohe Druck erfordert eine leistungsfähige Pumpe und führt zu einem hohen Stromverbrauch von 0,4 kWh/m³ verregnetes Wasser.
- Für den beschriebenen 72 ha Schlag werden zwei Beregnungsmaschinen mit einem Investitionsvolumen von je 38.000 € benötigt.
- Bei einer Wurfweite von 80 m sind bei einer unterstellten Schlaglänge von 1.200 m insgesamt 16 Hydranten erforderlich. Der Brunnen und das Leitungssystem verursachen in Summe Investitionen von etwa 100.000 €.
- Das Umsetzen der Maschinen ist vergleichsweise arbeitsintensiv. Für drei Beregnungsgänge wird mit einem Arbeitszeitbedarf von 0,8 h/ha kalkuliert.
- Ein wesentlicher technischer Nachteil der mobilen Bewässerungsmaschinen ist die ungenaue Wasserverteilung, die bei gleicher Wassermenge zu etwa 5 % geringeren Ertragszuwächsen führt, als bei den nachfolgend beschriebenen Kreisberegnungsmaschinen oder der Tropfbewässerung.

Kreisberegnungsmaschine

Im Vergleich zur mobilen Beregnungsmaschine ergeben sich für die Kreisberegnung folgende Unterschiede hinsichtlich der Technik und dem Investitionsbedarf:

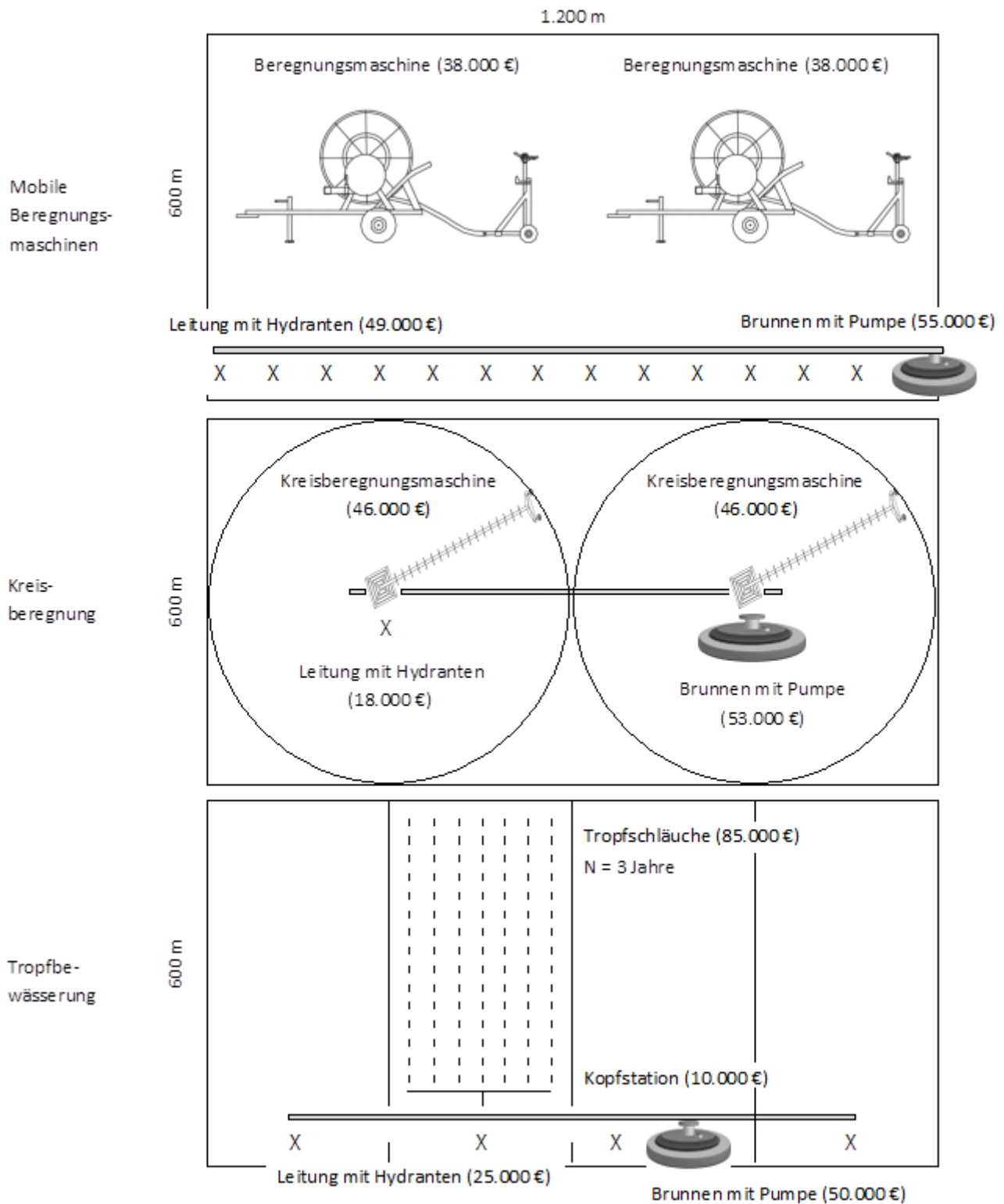
- Es sind zwei Kreisgegner mit einem Radius von 300 m und einem Investitionsvolumen von jeweils etwa 45.000 € erforderlich.
- Der Betriebsdruck der Kreisberegnungsmaschinen ist mit 4 bar nur etwa halb so hoch wie bei einer mobilen Beregnungsmaschine. In der Folge ist der Energiebedarf für die Wasserzuleitung etwa 40 % geringer. Der zusätzliche Strombedarf für den Antrieb der Kreisregner ist mit 50 kWh je ha und Jahr sehr gering.

- Aufgrund der Kreisform können die Ecken des Schlages nicht vollständig ausgerechnet werden. Zwar werden sogenannte Endregner installiert, die in den Schlagecken für die Bewässerung zugeschaltet werden, dennoch sinkt die bewässerte Fläche auf 62 ha (85 % der Gesamtfläche).
- Das Investitionsvolumen für das Leitungssystem und den Brunnen sinkt um etwa 30 % auf 70.000 €. Ursache ist, dass nur noch ein 600 m langes Leitungssystem mit zwei Hydranten erforderlich ist, wenn der Brunnen am Turm des ersten Kreisregners installiert werden kann. Hinzu kommt, dass aufgrund des geringeren Betriebsdruckes eine weniger leistungsfähige Pumpe ausreicht.
- Mit Kreisregnern wird eine bessere Wasserverteilung erreicht. In der Folge ist im Vergleich zur Bewässerung mit mobilen Beregnungsmaschinen bei gleicher Wassermenge mit einem 5 % höheren Ertragsanstieg zu rechnen (Fricke, 2017).
- Ein weiterer Vorteil im Vergleich zu mobilen Bewässerungsmaschinen liegt in dem geringen Arbeitszeitbedarf für die Bewässerung und dem hohen Grad der Automatisierung. In der Folge kann die Bewässerung deutlich feiner gesteuert werden und mehrere kleinere Wassergaben gegeben werden. Die Bewässerung kann damit besser an die jeweiligen Witterungsbedingungen angepasst werden.

Tropfbewässerung

Im Vergleich zu den vorherigen Verfahren ist für die Tropfbewässerung unterstellt worden, dass in jedem Jahr nur ein Viertel des Schlages bewässert wird. Ursache ist, dass sich die Tropfbewässerung aufgrund ihrer hohen Kosten nur für Sonderkulturen wie Kartoffeln rechnet und diese in der Fruchtfolge über den Schlag rotieren müssen. Weiterhin sind hinsichtlich der technologischen Eigenschaften und des Investitionsvolumens folgende Unterschiede zu den vorherigen Verfahren zu berücksichtigen:

- Für die Wasserzuleitung wird eine 600 m lange Wasserleitung mit vier Hydranten benötigt, um die Tropfbewässerung mit den Kartoffeln über die Fläche rotieren lassen zu können. Insgesamt sind für das Leitungssystem Investitionen von 75.000 € erforderlich.
- Zusätzlich sind eine Kopfstation (10.000 €) sowie Tropfschläuche erforderlich. Die Tropfschläuche verursachen Investitionen von 85.000 €. Allerdings können die Tropfschläuche in der Regel nicht länger als drei Jahre verwendet werden, was zu erheblichen Abschreibungen führt.
- Im Vergleich zu den anderen Bewässerungsverfahren ist der Arbeitsbedarf bei der Tropfbewässerung deutlich höher. Für das Auslegen und Einsammeln der Tropfschläuche wird ein Arbeitszeitbedarf von 27 h/ha kalkuliert.
- Aufgrund der exakteren Wasserverteilung und den geringeren Wasserverlusten ist von einem 20 % höheren Ertragsanstieg gegenüber der mobilen Bewässerung auszugehen.

Abbildung 12-2: Annahmen zum Investitionsbedarf für Bewässerungsverfahren

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von KTBL (2013).

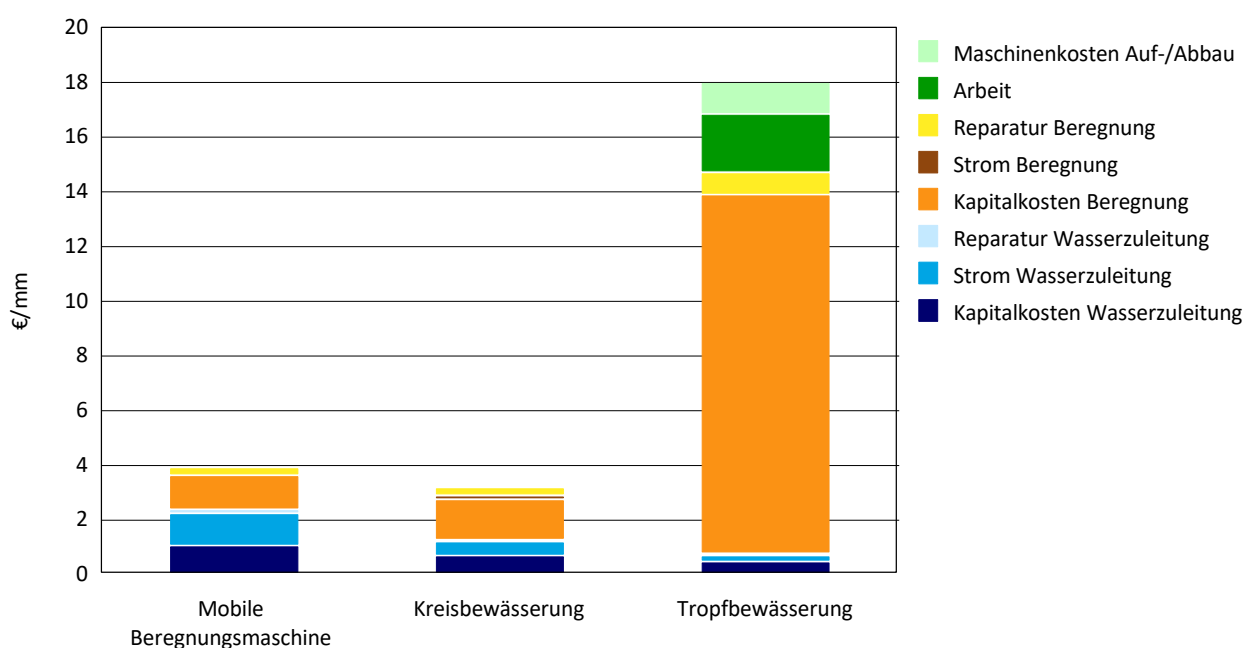
Vergleich der Bewässerungskosten

Nachdem zuvor die technischen Eigenschaften sowie der erforderliche Investitionsbedarf der betrachteten Bewässerungsverfahren beschrieben wurden, werden in Abbildung 12-3 die Kosten der Verfahren miteinander verglichen. Folgende Ergebnisse lassen sich ableiten:

- Die Tropfbewässerung ist mit 18 €/mm/ha mit Abstand das teuerste Bewässerungsverfahren. Die höchsten Kostenanteile verursachen die Kapitalkosten für die Tropfschläuche. Im Vergleich zu den anderen Verfahren entstehen ebenfalls hohe Kosten für die Arbeit und die Maschinen für den Auf- und Abbau der Tropfschläuche. Die hohen Kosten verdeutlichen, dass sich die Tropfbewässerung in der Regel nur für sehr umsatzstarke Sonderkulturen rechnet.
- Mobile Beregnungsmaschinen verursachen mit 4 €/mm/ha lediglich 20 % der Kosten von Tropfbewässerungsanlagen. Die Kosten für die Arbeit sind mit einem Anteil von 2 % an den Gesamtkosten vergleichsweise unbedeutend. Wesentlich stärker wirken sich die Kostenunterschiede in der Wasserzuleitung aus. Aufgrund des höheren Stromverbrauchs sowie der höheren Kapitalkosten sind die Kosten der Wasserzuleitung mit 2,26 €/m³ fast doppelt so hoch wie bei der Kreisberegnung.
- Die Kreisberegnung ist mit Vollkosten von 3,17 €/mm das günstigste Verfahren. Hauptvorteile sind der geringere Stromverbrauch, der geringere Arbeitszeitbedarf sowie die geringeren Kapitalkosten.

Für die hier betrachtete Region und den exemplarischen Schlag ist die Kreisberegnung somit das günstigste Bewässerungsverfahren.

Abbildung 12-3: Vollkosten verschiedener Bewässerungsverfahren



Quelle: Eigene Berechnung nach KTBL (2013).

12.4 Wirtschaftlichkeit der Feldbewässerung

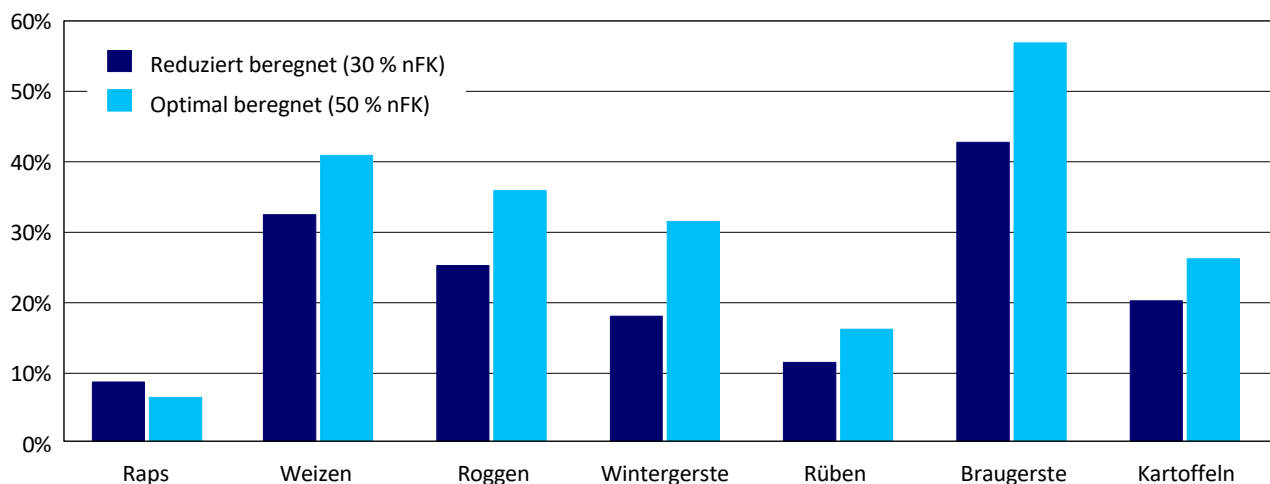
Nachdem im vorherigen Abschnitt gezeigt wurde, dass bei ausreichend großen Flächenstrukturen die Kreisberegnung in der Regel das günstigste Bewässerungsverfahren ist, wird nachfolgend die Wirtschaftlichkeit der Bewässerung kalkuliert. Als Kennzahl für die Wirtschaftlichkeit werden die berechnungskostenfreien Leistungen verschiedener Kulturen herangezogen. Sie ergeben sich aus den mit der Bewässerung zu erzielenden Mehrerlösen abzüglich der zusätzlich entstehenden Kosten. Vor einer Investition in die Bewässerung ist zu prüfen, ob alle durch die Beregnung entstehenden Kosten durch die Mehrerlöse gedeckt werden. Wenn bereits in eine Beregnungsanlage investiert wurde, reicht es für die Entscheidung, welche Kultur bewässert werden sollte, aus, die variablen berechnungskostenfreien Leistungen zu kalkulieren.

Um die mit der Bewässerung zusätzlich zu erzielenden Erlöse abzuschätzen, wird auf langjährige Versuchsergebnisse des Fachverbandes Feldberegnung für den Standort Hamerstorf zurückgegriffen (vgl. Abbildung 12-4). Die Standortbedingungen des Versuchsstandortes ähneln den Bedingungen in der Altmark, sodass die Ergebnisse übertragbar sind. In den Versuchen wird zwischen einer optimalen und einer reduzierten Beregnungsstrategie unterschieden. Bei der optimalen Beregnung wird mit der Bewässerung begonnen, wenn die nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum unter etwa 50 % sinkt. Bei der reduzierten Bewässerung wird erst ab einer nutzbaren Feldkapazität von 35 % bewässert.

Folgende Ergebnisse lassen sich aus der Abbildung ableiten:

- Raps reagiert mit weniger als 10 % Mehrertrag kaum auf die Beregnung.
- Ebenfalls vergleichsweise gering reagiert der Zuckerrübenерtrag auf die Bewässerung. Selbst in der optimal bewässerten Variante steigt der Ertrag um weniger als 20 % an.
- Je nach Bewässerungsregime werden im langjährigen Mittel im Getreide Mehrerträge von 18 bis 57 % erzielt. Braugerste reagiert von den Getreidearten am stärksten auf die Bewässerung. Selbst in der reduzierten Beregnungsvariante steigt der Braugerstertrag noch um 43 %. Die Erträge von Weizen und Roggen steigen durch die Bewässerung hingegen nur um 30 bis 40 %.
- Im Vergleich dazu sind die zusätzlichen Erträge bei Kartoffeln mit 20 bis 25 % vergleichsweise gering.

Neben den zusätzlichen Erträgen sind jedoch insbesondere bei Hackfrüchten auch Veränderungen der Qualitätseigenschaften zu berücksichtigen, die zu höheren Markterlösen führen können. Für Zuckerrüben zeigen mehrjährige Versuchsergebnisse einen Anstieg des Zuckergehaltes aufgrund der Bewässerung um 1,5 % (Fricke, 2006). Bei Kartoffeln sinken der Anteil von über- und untergroßen Knollen und der Schorfbefall, wodurch der Anteil vermarktungsfähiger Knollen steigt. Aufgrund der verbesserten Qualitätseigenschaften wird für die Kalkulation der Bewässerung für Zuckerrüben ein Erlösaufschlag von 0,2 €/dt und für Kartoffeln von 0,5 €/dt berücksichtigt.

Abbildung 12-4: Langjährige Mehrerträge durch Bewässerung am Standort Hamerstorf

Quelle: Fachverband Feldberegnung (2017).

In Tabelle 12-2 sind auf Basis der in Kapitel 12.3 durchgeführten Kostenkalkulationen sowie den aus Abbildung 12-4 abgeleiteten Ertragszuwächsen die beregnungskostenfreien Leistungen verschiedener Kulturen für den Standort Altmark dargestellt. Folgende Ergebnisse lassen sich ableiten:

- Raps und Wintergerste sind aufgrund der negativen beregnungskostenfreien Leistungen nicht beregnungswürdig.
- Kartoffeln erzielen mit über 1.500 € die mit Abstand höchsten beregnungskostenfreien Leistungen in der optimalen Beregnungsvariante. Vor diesem Hintergrund sollte bei einer Investition in die Beregnung der Kartoffelanbau mit in die Fruchtfolge aufgenommen werden.
- Ebenfalls vergleichsweise hohe beregnungskostenfreie Leistungen werden mit Rüben und Braugerste erzielt. Deutlich geringer sind die beregnungskostenfreien Leistungen von Weizen und Roggen.
- Aus ökonomischer Sicht sollten vor allem Kartoffeln, Rüben, Braugerste und Weizen optimal bewässert werden. Allerdings würde in diesem Fall die Wasserentnahmemenge auf 117 mm/ha steigen und den genehmigten Wert von 80 mm/ha deutlich überschreiten. Vor diesem Hintergrund müssen einzelne Kulturen weniger bewässert werden. Aufgrund der hohen Wirtschaftlichkeit der Kartoffelbewässerung sollte hier die optimale Bewässerung beibehalten werden. Die höchsten durchschnittlichen beregnungskostenfreien Leistungen werden in Kartoffel-Weizen-Rüben-Braugerste-Fruchtfolge erzielt, wenn die Kartoffeln und Rüben optimal beregnet und die Braugerste zur Hälfte optimal bzw. reduziert bewässert wird. In der Folge reichen die genehmigten Wasserentnahmerechte jedoch nicht mehr aus, um den Weizen zu bewässern.

Tabelle 12-2: Berechnungskostenfreie Leistungen für den Standort Altmark

			Raps	Weizen	Roggen	Wintergerste	Rüben	Braugerste	Kartoffeln
Beregnungs- menge	optimal	mm/ha	67	125	65	92	135	80	128
	reduziert	mm/ha	40	72	33	49	81	39	75
Ertrags- anstieg	optimal	dt/ha	2	25	23	19	103	23	114
	reduziert	dt/ha	3	20	16	11	73	17	88
Preisanstieg		€/dt	–	–	–	–	0,2	–	0,5
Zusatzerlös	optimal	€/ha	70	400	323	277	494	411	1.977
	reduziert	€/ha	94	320	228	158	385	309	1.584
Anstieg	optimal	€/ha	12	57	43	38	34	62	87
Direktkosten	reduziert	€/ha	16	45	30	22	24	47	68
Variable									
Beregnungs- kosten	optimal	€/ha	66	123	64	91	133	79	126
	reduziert	€/ha	39	71	32	48	80	38	74
Fixkosten									
Beregnung		€/ha	175	175	175	175	175	175	175
Beregnungs- kostenfreie Leistung	optimal	€/ha	-182	45	41	-27	152	96	1.588
	reduziert	€/ha	-136	29	-9	-87	107	49	1.267

Quelle: Eigene Kalkulationen auf Basis von Fachverband Feldberegnung (2017), KTBL (2013).

12.5 Fazit

Eine Investition in die Feldbewässerung ist selbst an trockenen und sandigen Standorten in Deutschland nur in Kombination mit dem Anbau von Hackfrüchten, v. a. Kartoffeln, wirtschaftlich. Dagegen ist eine Investition in die Bewässerung für reine Raps- und Getreidefruchtfolgen bei den hier unterstellten Annahmen nicht rentabel. Ursache ist, dass Raps kaum auf Bewässerung reagiert. Hinzu kommt, dass die bewässerungskostenfreien Leistungen von Weizen unter 50 €/ha liegen. Erst bei deutlich höheren Agrarpreisen mit Weizenpreisen im Bereich von 200 €/t wird die Bewässerung von reinen Getreidefruchtfolgen wirtschaftlich.

Bezüglich der Wassereffizienz rechnet sich bei ausreichend großen Schlägen bereits heute eine Investition in moderne Bewässerungsverfahren wie die Kreisberegnung. Hier kann bei gleicher Wassermenge mit einem 5 % höheren Ertragsanstieg gerechnet werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die genannten Einsparungen für die Infrastruktur der Wasserleitung sowie der geringere Energieverbrauch im Leitungssystem realisiert werden kann. Dies trifft nur zu, wenn das Leitungssystem neu gebaut wird. Wird eine Kreisberegnungsanlage hingegen an ein Leitungssystem angeschlossen, mit dem gleichzeitig mobile Bewässerungsmaschinen betrieben werden, können die Kostenvorteile in der Wasserzuleitung nicht realisiert werden.

Für den Einsatz von Kreisberegnungsanlagen müssen die agrarstrukturellen Voraussetzungen mit ausreichend großen Schlägen vorhanden sein. In Regionen mit kleinstrukturierten Flächen, in denen heute mobile Bewässerungsanlagen eingesetzt werden, könnten im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren die erforderlichen Voraussetzungen geschaffen werden.

In der Tropfbewässerung steigt die Wassereffizienz gegenüber der Kreisberegnung noch einmal deutlich an. Allerdings sind die Kosten derzeit in der Regel noch zu hoch. Bei einer weiteren Verknappung der Wasserrechte könnte die Tropfbewässerung für Kartoffeln wirtschaftlich werden. Ein weiterer Lösungsansatz könnte künftig darin bestehen, mobile Tropfbewässerungsanlagen zu installieren. Dabei werden die Tropfschläuche an einer Kreisberegnungsanlage angeschlossen. Auf diese Weise sinken die Lohnkosten in der Tropfbewässerung erheblich.

Literatur

- AMI (2017) Serviceportal Bund und Länder, Marktdaten Düngemittel, URL: <https://www.ami-informiert.de/ami-onlinedienste/serviceportal-bund-laender/duengemittel/marktdaten-download.html>, Abrufdatum: 17.11.2017
- Mohr R, Jerchel K (2017) Evaluierung von Fruchtfolgen mit und ohne Raps hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Treibhausgasbilanz unter Berücksichtigung der neuen Düngeverordnung, UFOP Schriften Agrar, URL: https://www.ufop.de/files/7814/9753/3830/UFOP_0000_Abschlussbericht_komplett_klein_kleiner_reduziertergroesse_optimiert.pdf Abrufdatum: 17.11.2017
- Fricke E (2017) Expertengespräch mit Ekkehard Fricke, Landwirtschaftskammer Niedersachsen am 05.09.2017
- KTBL (2013) Feldbewässerung Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen, KTBL Datensammlung
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2015) www.deutscher-klimaatlas.de. Erläuterungen zu den Klimaszenarien: Perzentile (Internet)
- Fachverband Feldberegnung e. V. (2017) Wirtschaftlichkeit Beregnung. Persönliche Mitteilung
- Fricke E (2006) Mehr Wasser für mehr Qualität. DLG-Mitteilungen 6/2006, S. 53-55 2006

13 Entwicklung des regionalen Bewässerungsbedarfs – Engpässe in der Zukunft?

Jano Anter, Peter Kreins, Dr. Claudia Heidecke und Dr. Horst Gömann

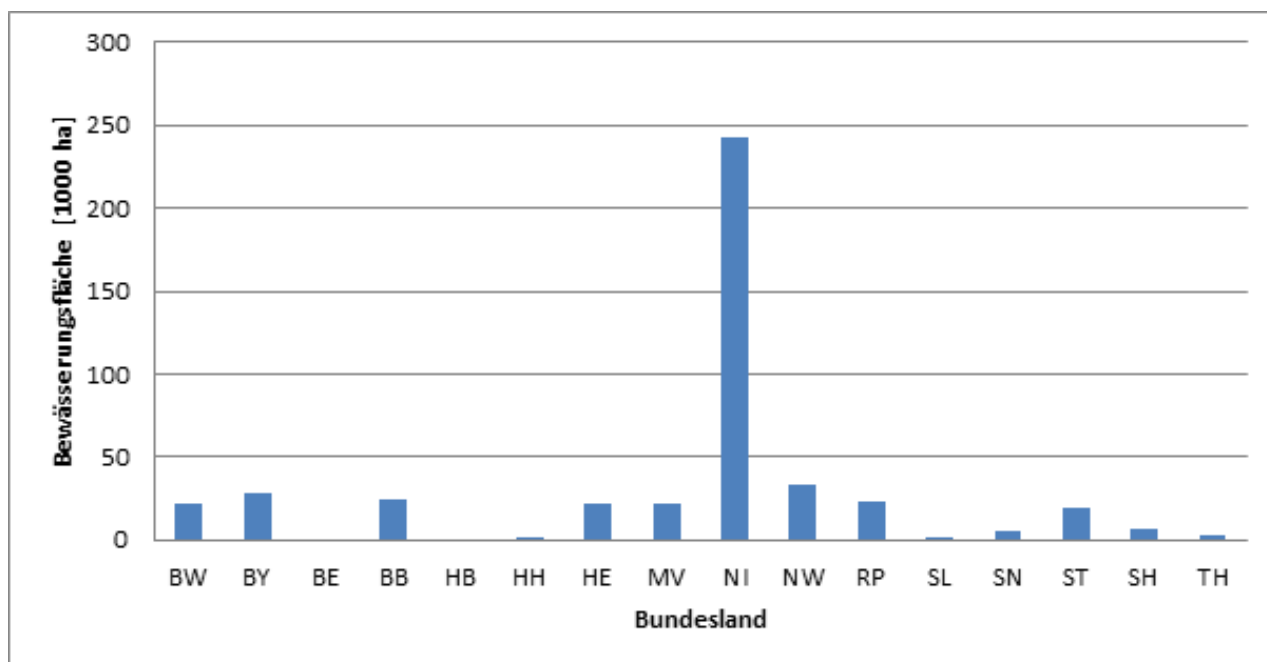
Thünen-Institut für Agrartechnologie, Thünen-Institut für Ländliche Räume, LWK Nordrhein-Westfalen)

13.1 Einleitung

Der landwirtschaftliche Sektor stellt weltweit betrachtet den bedeutendsten Wassernutzer dar. Global gesehen werden etwa 70 % der Wasserentnahmen für die landwirtschaftliche Produktion genutzt (Siebert et al, 2013). Dies ist jedoch aufgrund der standörtlichen und wirtschaftlichen Gegebenheiten regional sehr unterschiedlich. In Deutschland werden derzeit unter einem Prozent der Wasserentnahmen für die landwirtschaftliche Produktion gebraucht. Der überwiegende Anteil der Wasserentnahmen wird für die Industrie und für Haushalte verwendet (Aquastat, 2016).

In Deutschland spielt die landwirtschaftliche Bewässerung bisher nur in wenigen Regionen eine Rolle. Dennoch hat die landwirtschaftliche Wasserentnahme in den vergangenen Jahren weiter an Bedeutung gewonnen. So hat der Anteil an bewässerter landwirtschaftlicher Fläche im Zeitraum 2010-2015 um 5,8 % zugenommen. Im Jahr 2015 hatten in Deutschland insgesamt 17.330 Betriebe die Möglichkeit, eine Fläche von 676.400 ha zu bewässern. Die Fläche, die tatsächlich bewässert wurde, lag bei 451.000 ha. Insgesamt werden in Deutschland 2,7 % der landwirtschaftlichen Fläche bewässert (Statistisches Bundesamt, 2016). Niedersachsen ist dabei das bewässerungsintensivste Bundesland mit rund 242.000 ha bewässerter Fläche im Jahr 2015. Hier wird insbesondere in Nordost-Niedersachsen ein Großteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche bewässert. Intensive Bewässerungsregionen befinden sich auch in anderen Bundesländern, jedoch wird dort meist nur ein Zehntel der Bewässerungsfläche Niedersachsens beregnet (Abbildung 13-1, Statistisches Bundesamt 2016).

Abbildung 13-1: Bewässerte Fläche im Deutschland im Jahr 2012 nach Bundesländern (Tsd. ha)



Quelle: Destatis (2016).

Kartoffeln nehmen mit rund 22 Prozent den größten Teil der bewässerten Fläche ein, gefolgt von Gemüse und Erdbeeren im Freiland (13 %) sowie Körner- und Silomais (zusammen 13 %). Es werden unterschiedliche technische Systeme zur Bewässerung angeboten. Hiervon sind derzeit jedoch nicht alle Techniken in Deutschland aufgrund der hohen Anschaffungskosten und Arbeitsaufwände ökonomisch rentabel. Es wird erwartet, dass sich ändernde klimatische Bedingungen sowie damit einhergehende steigende Temperaturen und Evapotranspirationsraten entsprechend auf die landwirtschaftliche Produktion und auf die Grundwasserressourcen auswirken werden (Lee und Chung, 2007). Somit dürfte sich der Bewässerungsbedarf zukünftig auch auf weitere Kulturen ausweiten. Unklar ist bisher, wie sich der Klimawandel auf den Bewässerungsbedarf in Deutschland auswirken wird, und ob es bei einem gesteigerten Bewässerungsbedarf zukünftig zu Engpässen bei der Wasserversorgung und somit zu Konflikten hinsichtlich der Wassernutzung kommen kann.

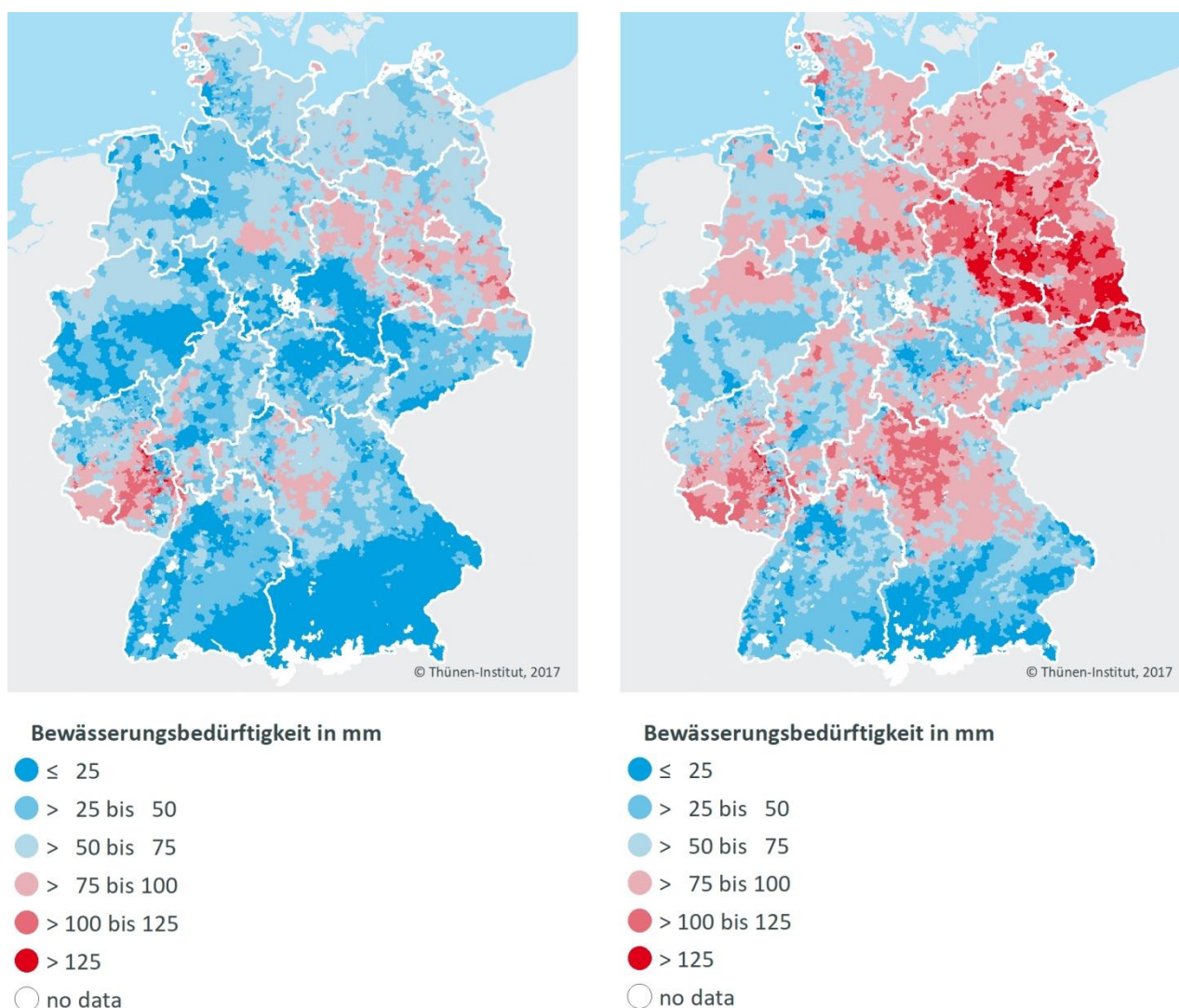
13.2 Bewässerungsbedürftigkeit und Bewässerungswürdigkeit in Deutschland

Im Rahmen des Projektes LandCare, welches zwischen 2005 und 2009 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde, konnte die Bewässerungsbedürftigkeit und die Bewässerungswürdigkeit am Beispiel der Kultur Weizen flächendeckend für Deutschland berechnet werden (Köster et al., 2014). Zentrale Faktoren für die Berechnung der Beregnungsbe-

dürftigkeit im Projekt waren die nutzbare Feldkapazität und die Wasserbilanz, in der unter anderem der kulturabhängige Pflanzenwasserbedarf durch die Geisenheimer Methode berücksichtigt wurde. Diese Größen wurden flächendeckend auf Gemeindeebene auf Grundlage der erstellten GIS-Datengrundlage berechnet. Für die Simulation der zukünftigen Entwicklung des Beregnungsbedarfs wurde eine Realisierung des Klimaszenarios A1B für den Zeitraum 2007-2060 verwendet, das mittels des statistischen Regionalmodells STAR 2 des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) regionalisiert wurde.

Hier wird deutlich, dass die Beregnungsbedürftigkeit in Deutschland, aber insbesondere in Nordost-Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und in Brandenburg, sowie in Rheinland-Pfalz stark zunimmt (Abbildung 13-2).

Abbildung 13-2: Beregnungsbedürftigkeit Winterweizen 1990-2006 (links) und 2021-2040 (rechts)

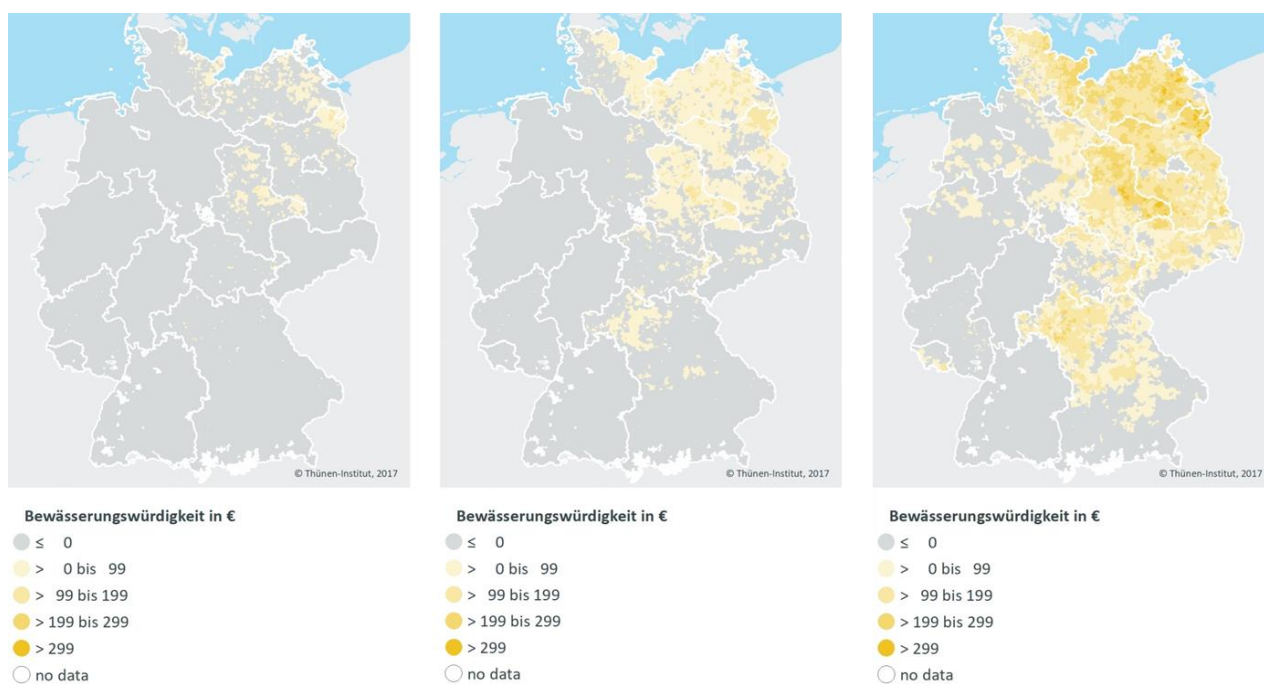


Quelle: Gömann et al. (2009); LandCare Endbericht.

Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Realisation des A1B-Szenarios wurde für die Zeitscheiben 2021-2040 gegenüber 2041-2060 am Beispiel des Winterweizens ein bundesweiter Anstieg des durchschnittlichen Beregnungsbedarfes um ca. 10 % ermittelt.

Für die Bestimmung der Beregnungswürdigkeit wurden zunächst die Kosten der Beregnung für unterschiedliche Beregnungsverfahren zusammengestellt. Die Datengrundlage stammt unter anderem aus einer empirischen Erhebung bei Beregnungsfirmen. Den Kosten wurden die Erlöse durch die Beregnung gegenübergestellt, die vor allem aus dem beregnungsbedingten Mehrertrag resultieren. Die zusätzliche erzielbare Marktleistung wurde um die höheren Kosten für Vorleistungen bereinigt (Abbildung 13-3).

Abbildung 13-3: Beregnungswürdigkeit im Zeitraum 2021-2040 in Abhängigkeit der Agrarpreise am Beispiel Winterweizen (Szenario der Preisentwicklung niedrig/baseline/hoch)



Quelle: Gömann et al. (2009); LandCare Endbericht.

Eine Wirtschaftlichkeit der Beregnung von Winterweizen im Zeitraum 1990-2006 ist nach den Annahmen mit den Preisen von 1999 (11,19 €/dt) nur in vereinzelten Gemeinden in Ostdeutschland zu verzeichnen. Für den Zeitraum 2021-2040 erhöht sich die Beregnungswürdigkeit von Winterweizen bei niedriger Preisentwicklung (14,02 €/dt) nur sehr gering. Bei mittlerer Preisentwicklung (16,28 €/dt) ist nach den Berechnungen eine Wirtschaftlichkeit auch in wenigen Gemeinden im Norden Bayerns, bei hoher Preisentwicklung (20,99 €/dt) zudem auch in Nordost-Niedersachsen gegeben.

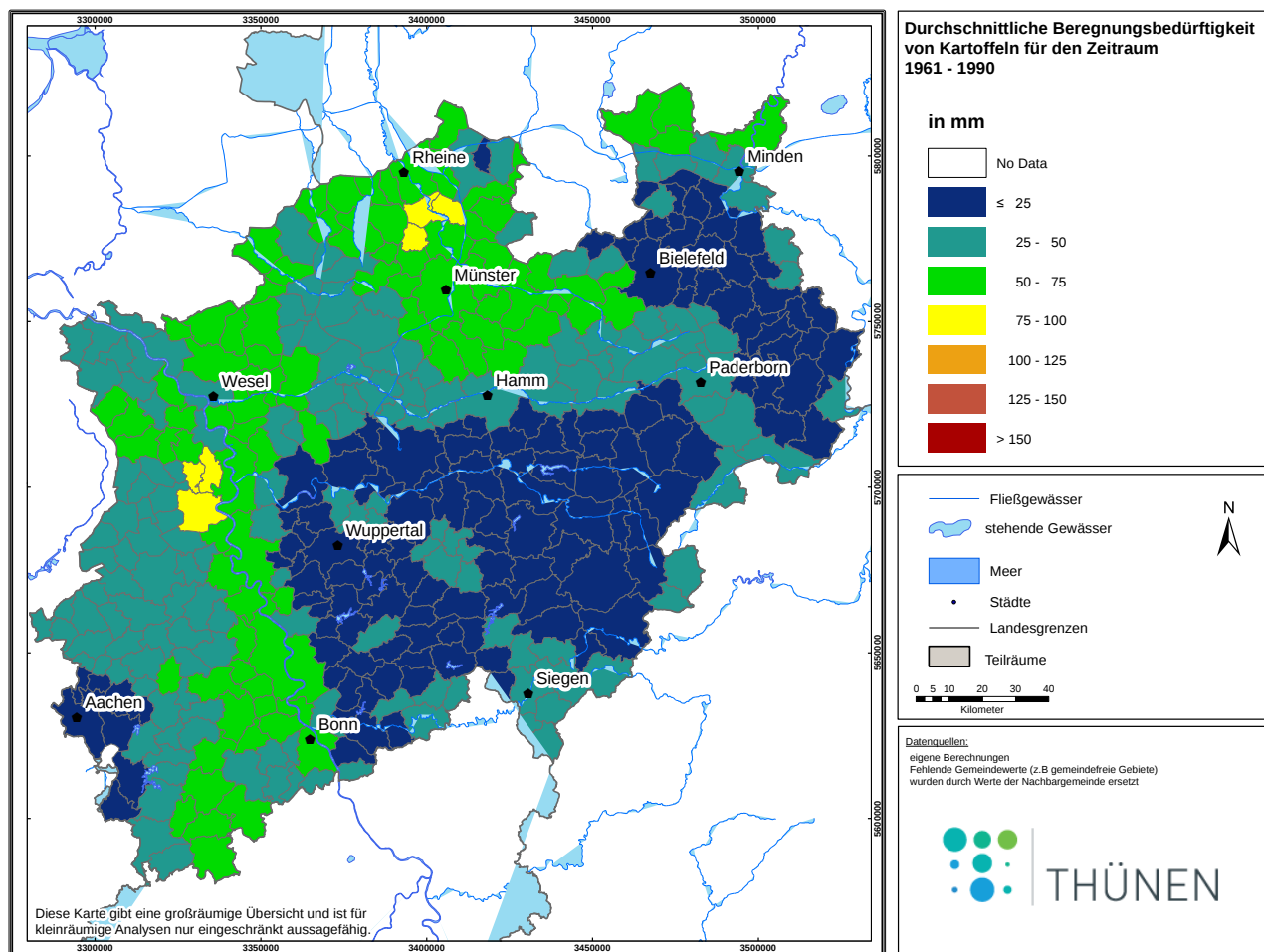
13.3 Berechnungswürdigkeit am Beispiel von Nordrhein-Westfalen

In den deutschlandweiten Analysen zeigte sich, dass die Beregnungsbedürftigkeit deutschlandweit tendenziell zunehmen wird, allerdings ist dies regional sehr unterschiedlich. Die Bewässerungsmenge ist zudem stark abhängig von der landwirtschaftlichen Produktion. So wird der Obst- und Gemüsebau bisher stärker bewässert, als dies für viele Ackerkulturen der Fall ist. Die Datengrundlage ist jedoch sehr heterogen und häufig nicht im Detail vorhanden. Daher förderte das Land Nordrhein-Westfalen ein Projekt (ERB-NRW), welches im Zeitraum 2011-2013 vom Thünen-Institut in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich erarbeitet wurde. Ein Ziel des Projektes war, den Bewässerungsbedarf auf Gemeindeebene auch für Sonderkulturen differenzierter abzubilden.

Für die Ermittlung des potenziellen Beregnungsbedarfes sind der Niederschlag, die Verdunstung durch Pflanzen und Boden (die sogenannte Evapotranspiration (ET)) und die pflanzenverfügbare Wassermenge (nutzbare Feldkapazität in der durchwurzelter Bodenschicht) maßgeblich. Der Beregnungsbedarf wurde für 13 gärtnerische und fünf landwirtschaftliche Kulturen berechnet.

Abbildung 13-4 stellt die Beregnungsbedürftigkeit für Kartoffeln dar. In der Ist-Situation (Durchschnitt 1961-1990) besteht für Kartoffeln in den weiten Teilen NRWs eine geringe Bewässerungsbedürftigkeit (25-50 mm). In den Regionen des Nördlichen Sauer- und Siegerlandes gibt es keine Bewässerungsbedürftigkeit (< 25 mm) aufgrund der hohen nFK der dortigen Lehmböden und der hohen Niederschläge. Allerdings sind Kartoffel- und Gemüseproduktion auf diesen Standorten durch schwere Bodenbearbeitbarkeit, Hanglagen und kühles und regenreiches Klima regional nicht relevant. In verschiedenen Regionen des Rheintals, im östlichen Niederrheinischen Tiefland sowie in der Westfälischen Bucht besteht eine geringe Bewässerungsbedürftigkeit (50-70 mm) durch niedrige nFK auf den leichten sandigen Böden. In den nordöstlichen Regionen der Westfälischen Bucht ist die Bewässerungsbedürftigkeit für Kartoffeln höher (75-100 mm) als für Möhren (50-75 mm). Gründe hierfür sind das größere Durchwurzelungsvolumen, die höhere Evapotranspiration und die spätere Wachstumsphase der Kartoffeln. Im Zeitverlauf für die Jahre 1960, 1990, 2021 und 2050 erhöht sich die regionale Bewässerungsbedürftigkeit in den untersuchten Klimaszenarien für Kartoffeln deutlich.

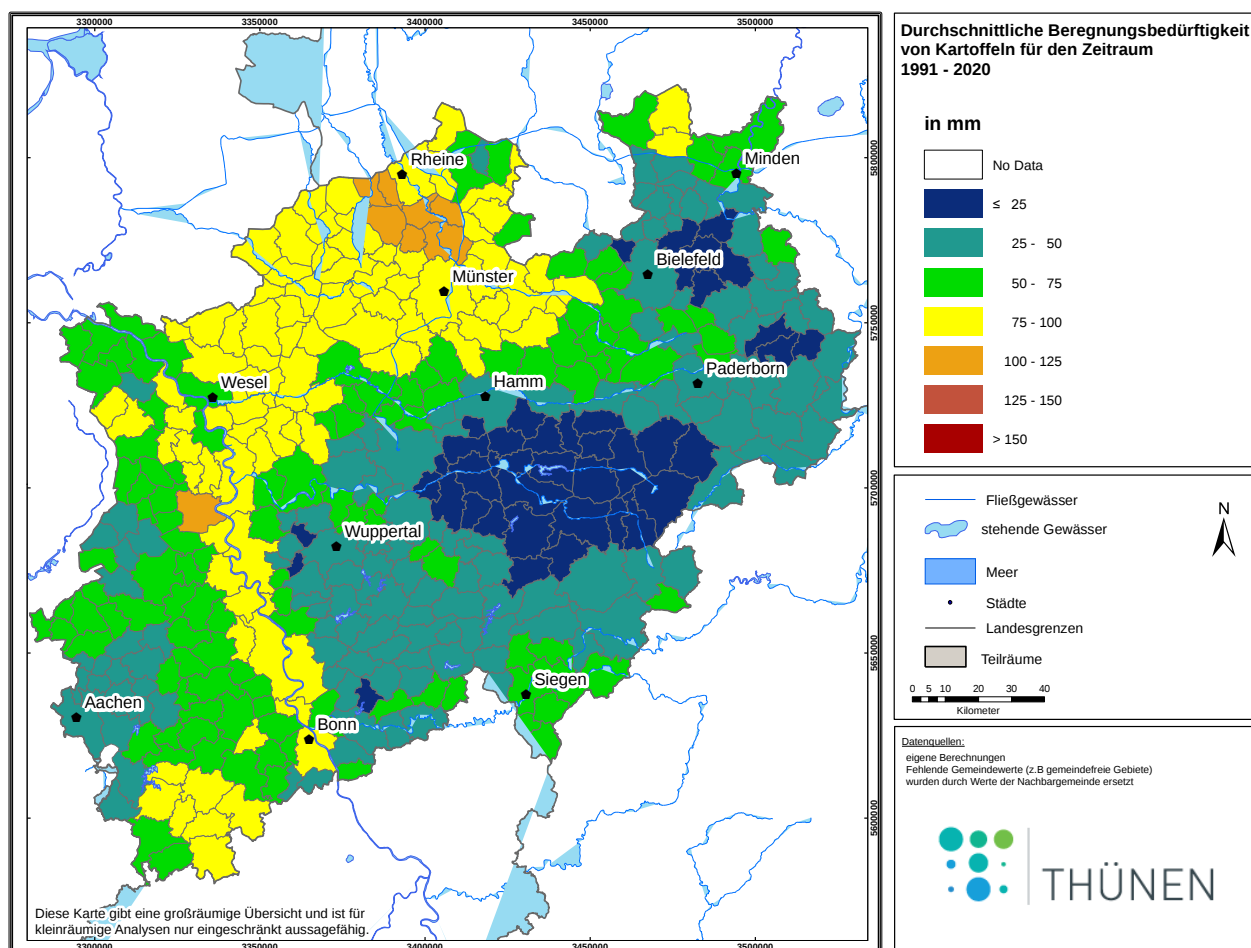
Abbildung 13-4: Durchschnittliche Beregnungsbedürftigkeit von Kartoffeln für den Zeitraum 1961-1990



Quelle: Kreins et al. (2013; 2015).

Von 1960 nach 2020 steigt die Bewässerungsbedürftigkeit der Kartoffeln auf den Sandböden des Rheintals und im Norden der Westfälischen Bucht von geringer Bewässerungsbedürftigkeit (50-75 mm) auf hoch (100-125 mm) bis sehr hoch (>125 mm). Auf Standorte mit sehr geringer Bewässerungsbedürftigkeit (25-50 mm) im Jahr 1960 steigt die Bewässerungsbedürftigkeit auf hoch (100-125 mm) an.

Abbildung 13-5: Durchschnittliche Beregnungsbedürftigkeit von Kartoffeln für den Zeitraum 1991-2020



Quelle: Kreins et al. (2013; 2015).

Für den Zeitraum 2051-2080 steigt die Beregnungsbedürftigkeit der Kartoffel landesweit noch einmal deutlich zur Vorperiode an. So ist die Bewässerungsbedürftigkeit für Kartoffelbauggebiete und weite Teile der Untersuchungsregion extrem hoch (>150 mm). Entlang des Rheins sowie nördlich von Wesel steigt der kalkulierte Beregnungsbedarf sogar auf mehr als 200 mm pro Jahr an.

Um den sektoralen und regionalen Beregnungsbedarf für NRW abzuleiten, wurden alle untersuchten 13 gärtnerischen und fünf landwirtschaftlichen Kulturen zusammengefasst und deren kulturarten- und regionsspezifische Beregnungsbedarfe mit den regionalen Anbauumfängen der Kulturarten gewichtet. Hierbei wurde angenommen, dass die ermittelten Beregnungsmengen bei den Sonderkulturen voll anzurechnen sind, während sich eine Beregnung der landwirtschaftlichen Kulturen erst ab einer bestimmten Mindestberegnungsmenge lohnt. Diese wurde in Abhängigkeit der Ertragssensibilität und der Höhe der Erlöse bei Kartoffeln und Zuckerrüben bei 20 bzw. 30 mm und bei Winterweizen bzw. bei Mais bei 40 bzw. 70 mm festgelegt. Regionale Bereg-

nungsbedarfe dieser Kulturen, die unterhalb dieser Mindestberechnungsmenge liegen, wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 13-1: Entwicklung des Beregnungsbedarfs in der Landwirtschaft in NRW (in Mio. m³)

	1961-1990			1990-2020		
	Gesamt	Landwirtschaft	Gartenbau	Gesamt	Landwirtschaft	Gartenbau
NRW	14,1	3,4	10,7	25,1	12,6	12,4
Düsseldorf	6,2	1,9	4,4	10,9	6	4,9
Köln	3,4	0,8	2,6	7,1	4,2	3
Münster	2,9	0,6	2,3	4,9	2	2,9
Detmold	1,3	0,2	1,2	1,8	0,4	1,3
Arnsberg	0,3	–	0,3	0,4	0	0,4

	2021-2050			2051-2080		
	Gesamt	Landwirtschaft	Gartenbau	Gesamt	Landwirtschaft	Gartenbau
NRW	56,6	39,4	17,1	128,6	101,9	26,6
Düsseldorf	22,7	15,9	6,9	50,2	39,5	10,7
Köln	21,5	17,5	4	50,5	44,3	6,2
Münster	7,2	3,5	3,7	12,5	7	5,6
Detmold	4,2	2,2	2	11,2	8	3,2
Arnsberg	1	0,4	0,6	4,1	3,1	1

Quelle: Kreins et al. (2013; 2015).

In Tabelle 13-1 werden die Wasserbedarfe für die landwirtschaftliche Beregnung in NRW für verschiedene Zeiträume aufgezeigt. Für die Ausgangssituation wird für NRW ein Wasserbedarf von rund 19 Mio. m³ berechnet. Dieser Wasserbedarf verteilt sich sehr unterschiedlich auf die Regierungsbezirke. Relativ hoch ist der Beregnungsbedarf in den Regierungsbezirken Düsseldorf, Köln und Münster, während noch nicht einmal 10 % der Gesamtwassermenge in den Regierungsbezirken Detmold und Arnsberg benötigt wird. Die Höhe des eingesetzten Beregnungswassers sowie die regionalen Schwerpunkte der Beregnung stimmen mit einer statistischen Auswertung für das Jahr 2009 recht gut überein, wobei zu berücksichtigen ist, dass es sich bei den Berechnungen um Durchschnittswerte für einen längeren Zeitraum und bei der statistischen Auswertung um spezifische Werte des Jahres 2009 handelt, und dass die Jahresberegnungsmenge im Zeitablauf in Abhängigkeit des Witterungsverlaufs sehr stark variieren kann.

Für die zukünftigen Zeitperioden wird ein erheblicher Anstieg des Wasserbedarfs für die landwirtschaftliche Beregnung ausgewiesen. Da ein Anstieg der Verdunstung insbesondere für die Vegetationsperiode projiziert wird, ist demzufolge mit einem entsprechenden Anstieg der Beregnungsbedürftigkeit zu rechnen. So nimmt nach diesen Berechnungen der Wasserbedarf schon bis

zum Jahr 2020 um das 2½-fache zu, wobei gleichzeitig eine Verschiebung der regionalen Beregnungsschwerpunkte zwischen den Regierungsbezirken stattfindet. Während sich der Wasserbedarf in den Regierungsbezirken Düsseldorf und Köln etwa verdoppelt, steigt der Wasserbedarf in Münster um rund das Vierfache im Vergleich zur Vorperiode an. Auch findet eine zunehmende Verschiebung der Bedeutung des Beregnungsbedarfs zwischen den landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Kulturen statt.

Der Wasserbedarf steigt bei den Gartenbaukulturen in NRW um weniger als 50 % an, während er sich bei den landwirtschaftlichen Kulturen etwa verdreifacht. Im Zeitablauf verstärken sich diese Entwicklungstendenzen. Bis zur letzten betrachteten Zeitperiode (2051-2080) steigt in NRW der Wasserbedarf um rund das 19-fache auf etwa 350 Mio. m³ an. Hiervon entfallen mehr als 90 % auf die landwirtschaftliche Beregnung. Die Verlagerung des Beregnungsschwerpunktes, von den Gartenbaukulturen hin zu den landwirtschaftlichen Kulturen, erklärt sich wie folgt: In der Ausgangssituation werden alle gärtnerischen Kulturen beregnet. Somit steigt im Zeitablauf der Wasserbedarf etwa entsprechend des Rückgangs der klimatischen Wasserbilanz für den Zeitraum des Anbaus der gärtnerischen Kulturarten. Demgegenüber werden bei den landwirtschaftlichen Kulturen in der Ausgangssituation nur relativ wenige Flächen beregnet. Im Zeitablauf steigt auf diesen Flächen, ähnlich wie bei den gartenbaulichen Kulturen, der Wasserbedarf etwa entsprechend des Rückgangs der klimatischen Wasserbilanz für den Zeitraum des Anbaus der Kulturen. Zusätzlich entwickelt sich aber ein zunehmender Beregnungsbedarf auf den landwirtschaftlichen Flächen, die in der Ausgangssituation nicht beregnet wurden. Da hinter dieser Ausdehnung ein deutlich höheres Flächenpotenzial im Vergleich zu den beregneten gartenbaulichen Kulturen steht, kommt es zu der berechneten deutlichen Verschiebung der Beregnungsschwerpunkte zu Gunsten der landwirtschaftlichen Kulturen.

13.4 Wasserengpässe in der Zukunft? – Beispiel NRW

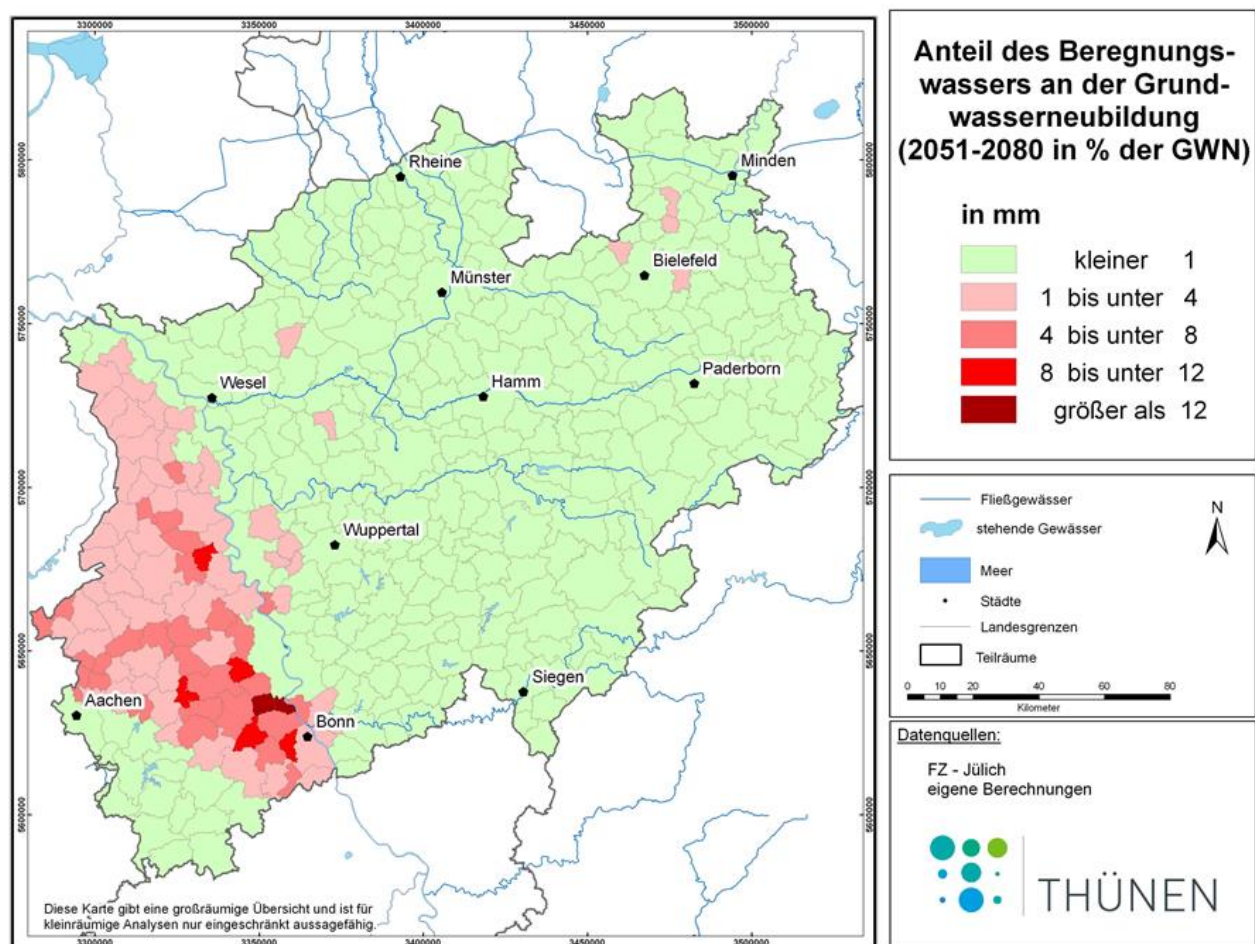
Die Grundwasserneubildung wurde basierend auf den Klimadaten des WETTREG-Modells vom Forschungszentrum Jülich berechnet. Sie ist im Wesentlichen vom regionalen Niederschlag, der Verdunstung, der Bodenart und der Topografie abhängig. In der Ausgangssituation ist eine durchschnittliche jährliche Grundwasserneubildung von rund 5 Mrd. m³ zu beobachten. Die modellierte Entwicklung der Grundwasserneubildung von 1962 bis 2100 zeigt einen leicht fallenden Trend um durchschnittliche 300-400 Mio. m³ oder rund 7 %.

Dieser Abfall und der steigende Beregnungsbedarf führen zu einem überproportionalen Anstieg des Beregnungsbedarfes in Relation zur Grundwasserneubildung. Für den Zeitraum von 2070 bis 2100 ist nach den WETTREG-Ergebnissen in NRW beim untersuchten Szenario A1B, abgesehen von wenigen Regionen, von einer deutlich geringeren Grundwasserneubildung auszugehen, wobei es große Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen gibt. So wird für die Niederrheinische Bucht und für Teile der Eifel ein Rückgang der Grundwasserneubildung von mehr als 30 % erwartet. Demgegenüber wird für den gleichen Zeitraum für die Kreise Oberbergischer Kreis,

Märkischer Kreis, Olpe, Recklinghausen und Coesfeld sogar eine Zunahme der Grundwasserneubildung projiziert.

Als Indikator zur Darstellung von regionalen Wasserengpässen kann der Anteil des Beregnungsbedarfes an der Grundwasserneubildung genutzt werden. Im Zeitraum 1991-2020 erhöhen sich die Anteile des Beregnungsbedarfes an der Grundwasserneubildung um zwei bis drei Prozentpunkte in den Regionen westlich des Rheins, sowie im nördlichen Niederrheinischen Tiefland und der Westfälischen Bucht (vgl. Abbildung 13-6). In der Niederrheinischen Bucht erklären die geringeren Niederschläge von 600 bis 700 mm die relativ hohen Anteile des Wasserbedarfs an der Grundwasserneubildung von 5 bis 7 %. Im Nordwesten des Niederrheinischen Tieflandes, wo die Niederschlagsmengen mit 800 bis 900 mm höher sind, erklärt der hohe Beregnungsbedarf die hohen Anteile an der Grundwasserneubildung. In der Periode von 2020 bis 2050 erhöhen sich die Anteile des Beregnungsbedarfes an der Grundwasserneubildung auf mindestens 4 % in allen Regionen mit weniger als 900 mm Niederschlagsmengen. Die Linksrheinischen Regionen in der Niederrheinischen Bucht sowie die Regionen im Nordwesten des Niederrheinischen Tieflandes weisen mit weniger als 700 mm Niederschlag z. T. Anteile von 12 % auf.

Abbildung 13-6: Anteil des Beregnungswassers an der Grundwasserneubildung



Quelle: Kreins et al. (2015).

13.5 Schlussfolgerung

Bislang lohnt sich nach ökonomischen Gesichtspunkten die Beregnung nur in wenigen Regionen in Deutschland. Insbesondere in Nordost-Niedersachsen und in einzelnen Gebieten anderer Bundesländer, wie z. B. im Hessischen Ried, wo der Kartoffelanbau oder der Gemüse- und Sonderkulturanbau eine große Rolle spielt, befinden sich die größten Bewässerungsflächen in Deutschland. Die vorgestellten Forschungsergebnisse zeigen, dass sich der Beregnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen je nach Klimaszenario und Region in Zukunft ausweiten kann. Die Beregnungswürdigkeit, also ob Beregnung ökonomisch sinnvoll ist, wird stark von den jeweiligen Preisen für Agrarprodukte abhängen. Es zeigte sich zudem, dass der Beregnungsbedarf mit der Menge an verfügbarem (Grund-)Wasser in Beziehung gesetzt werden muss, um Engpässe des Wasserdargebots zukünftig mit einzubeziehen. Hier zeigten die Ergebnisse, dass für NRW der durchschnittliche Beregnungsbedarf (unter sonst gleichen Bedingungen) von derzeit 18 Mio. m³ bis 2100 auf 350 Mio. m³ um rund das 20-fache steigen könnte, wenn sich insbesondere die Verdunstung entsprechend der Annahmen des gewählten Klimaszenarios entwickelt. Dies kann jedoch nach Wahl der Annahmen und der zugrunde liegenden Datenbasis, insbesondere der gewählten Klimaszenarien, variieren. Die Analysen zeigten, dass insbesondere die Klimaszenarien die Ergebnisse in erheblichem Maße beeinflussen und dass daher die Unsicherheit des jeweiligen Klimaszenarios für die Aussagen der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Nur etwa ¼ des Anstiegs der Beregnungsbedürftigkeit ist auf die sinkenden Niederschläge zurückzuführen. Der überwiegende Anteil dieser Entwicklung lässt sich mit etwa 75 % durch die im Klimaszenario unterstellte steigende Verdunstung erklären. Nutzungskonflikte wären unter diesen Rahmenbedingungen zunehmend zu erwarten, zumal dann der Anteil des Beregnungswassers zukünftig regional bis zu 50 % der Grundwasserneubildung ausmachen kann.

Literatur

AQUASTAT (2016) Country Fact Sheet Germany, Aquastat. FAO

Anter J, Gömann H, Kreins P, Richmann A (2009) Einfluss sich wandelnder ökonomischer Rahmenbedingungen auf die Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen in Deutschland, Landbauforschung Sonderheft 328

Kreins P, Henseler M, Anter J, Herrmann F, Wendland F (2015) Quantification of climate change impact on regional agricultural irrigation and groundwater demand, Water Resources Manag 29(10):3585-3600

Kreins P, Anter J, Henseler M (2013) ERB-NRW- Projektbericht: Entwicklung des regionalen Beregnungsbedarfes für die Landwirtschaft, 2013, Studie im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Unveröffentlicht

Köstner B, Wenkel KO, Berg M, Bernhofer C, Gömann H, Weigel H-J (2014) Integrating regional climatology, ecology, and agronomy for impact analysis and climate change adaptation of German agriculture: An introduction to the LandCaRe2020 project, Eur J Agron 52:1-10

Siebert S, Heinrich V, Frenken K Burke J (2013) Update of the global map of irrigation areas to version 5. Project report, Bonn, Germany

Statistisches Bundesamt (2010) Fachserie 3, Heft 5, 2010

14 Herausforderungen für die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen in Deutschland

Dr. Sonja Schimmelpfennig, Dr. Claudia Heidecke, Jano Anter

Thünen-Institut für Ländliche Räume, Thünen-Institut für Agrartechnologie

14.1 Hintergrund

Der vorliegende Beitrag stellt die Herausforderungen für die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen und für ein effizientes Wassermanagement in Deutschland in einem kurzen Überblick dar. Dazu baut der Beitrag auf den bisherigen Kapiteln in diesem Tagungsband auf und stellt zunächst die bisherigen Schwerpunkte aus Projekten und der Forschungslandschaft heraus. Um die Herausforderungen zu diskutieren, werden anschließend die Chancen und Risiken von Bewässerung und nachhaltiger Bodenbearbeitung, der künstlichen Grundwasseranreicherung und Entlastung von Grundwasserkörpern sowie regionalem Wassermanagement diskutiert. Abschließend wird in diesem Beitrag ein kurzer Ausblick gegeben.

Im globalen Vergleich ist der Anteil der Wasserentnahme für die landwirtschaftliche Bewässerung aus Grundwasser und Oberflächengewässern am Gesamt-Wasserverbrauch in Deutschland mit 1 % gering. Dies muss aber in Relation zur Gesamtwasserentnahmemenge und den regional sehr unterschiedlich vertretenen Sektoren wie Privathaushalten und Industrie gesehen werden. Auch weist die Wasserentnahme zur landwirtschaftlichen Nutzung in Deutschland große regionale Unterschiede auf und beträgt z. B. in der intensiv beregneten Region Nordostniedersachsen ca. 80 %.

In Folge des in Deutschland seit 1881 beobachteten Anstiegs der Jahresdurchschnittstemperatur um 1,3 °C und auch im Hinblick auf eine Fortsetzung des Temperaturanstiegs, ist in Zukunft mit einer erhöhten potenziellen Verdunstung und einem steigenden Bewässerungsbedarf für landwirtschaftliche Kulturen zu rechnen (siehe Kapitel 2). Dies könnte eine Anpassung der Bewässerung und Neuorganisation des Wassermanagements erforderlich machen. Eine frühzeitige und proaktive Prüfung möglicher Änderungen im Wasserbedarf verschiedener Akteure und Sektoren ist dabei der Entwicklung nachhaltiger Strategien zuträglich.

Bei Zunahme des Wasserbedarfs für die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen mit dem Ziel des Erhalts bzw. der Erhöhung der Flächenproduktivität stellt sich die Frage, ob dies mit den Bedarfen anderer Wasser- und Flächennutzer wie Industrie und Privathaushalte, des Naturhaushaltes und gesellschaftlicher Ansprüche und Richtlinien vereinbar ist. Dies macht die Notwendigkeit der Entwicklung regionaler Lösungsansätze und der Anwendung differenzierter Maßnahmen für das Wassernutzungsmanagement deutlich.

14.2 Bewässerung als Anpassungsmaßnahme – bisherige Projekte

Neben einzelnen Regionalstudien (Kapitel 13) förderte das BMBF in den Jahren 2005-2012 mit dem Programm „klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ die Entwicklung von Technologien und Strategien zum Umgang mit dem Klimawandel. Die geförderten Projekte, die sich auch mit dem Wassermanagement der Zukunft beschäftigten, sollten zur Einschätzung und Minderung von Risiken aber auch zur Identifizierung von Chancen, die sich mit dem Klimawandel für Wirtschaft und Gesellschaft ergeben können, beitragen. Weitere Ergebnisse regionsspezifischer Untersuchungen zum Einfluss von Klimaänderungen auf das Wassermanagement sowie zu den Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen wurden in den letzten Jahren u.a. in den vom BMBF geförderten Klimazug-Projekten (Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten, 2009-2013) erarbeitet. Bereits heute existierende Probleme bezüglich der Nutzung der zur Verfügung stehenden Wassermenge wurden identifiziert und anhand regionaler Klimamodelle in die Zukunft projiziert. Insgesamt stimmen alle Untersuchungen, die im Rahmen der Klimazug-Projekte durchgeführt wurden, unabhängig von der Größe und der Art der Untersuchungsgebiete dahingehend überein, dass in Folge des Klimawandels mit zunehmenden Problemstellungen zu rechnen ist (Kaden, 2014). Durch die Projekte erfolgte eine unvermeidliche projektbedingte Schwerpunktsetzung je nach regionsspezifisch unterschiedlichen Problemfeldern, deren Lösungsansätze jedoch teilweise auf andere Regionen übertragen werden können.

14.3 Bewertung verschiedener Methoden zur Anpassung an zunehmende Trockenheit

Die Wirkung der Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen als Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel kann durch die Förderung der Speicherfähigkeit der Böden und der Wassernutzung der Pflanzen maßgeblich unterstützt werden (Köstner und Lorenz, 2014). So stellt die Umsetzung von bodenschonenden, konservierenden Bewirtschaftungsmethoden eine Anpassungsmaßnahme an sinkende Niederschläge in trockenheitsgefährdeten Gebieten dar. Auch ein Wechsel der Pflanzenarten und -sorten stellt eine Anpassungsmaßnahme an den prognostizierten Rückgang der Sommerniederschläge und ggf. Extremwetterereignisse (Verwendung von Arten und Sorten mit kräftigen Stängeln) dar.

Eine Bewertung der Maßnahmen „Anpassung der Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen“, „bodenschonende konservierende Bewirtschaftungsmethoden“ und „Einsatz angepasster Pflanzensorten“ wurde im Rahmen des Projekts „Ökonomie des Klimawandels: Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel“ untersucht. Dabei wurden die Maßnahmen, soweit quantifizierbar, anhand ihrer Kosten und ihres Nutzens sowie mit Hilfe weiterer Kriterien (z. B. Mitnahmeeffekte der Maßnahme und regret/no-regret-Ansätze) bewertet (Tabelle 14-1, Tröltzsch et al., 2012). Für den Nutzen der jeweiligen Anpassungsmaßnahme wurde der Ertragsrückgang durch die projizierten Klimaänderungen des IPCC herangezogen. Nach De Groot (2006) beträgt der für die Niederlande errechnete und für Norddeutschland übernommene Er-

tragsrückgang durch zunehmende Trockenheit 22-37 %. Dem gegenüber stehen die Investitionen für die Maßnahme, mit der den prognostizierten Ertragsrückgängen entgegengewirkt werden kann. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Bewässerung zeigte eine große Bandbreite. Die Wirtschaftlichkeit der Anpassungsmaßnahme war gegeben, wenn durch die Bewässerung der Ertrag stark gesteigert werden konnte. Zudem sollte die Gewinnmarge für die angebaute Sorte relativ hoch sein. Es wurde angenommen, dass Landwirte aus Eigeninteresse in die Bewässerung von Nutzflächen investieren.

Tabelle 14-1: Bewertung der Anpassungsmaßnahmen „Konservierende bodenschonende Bewirtschaftungsmethoden“, „Anpassung der Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen“ und „Einsatz angepasster Pflanzensorten“ nach den Kriterien „no/low/high regret“ und ihrer Relevanz (Auszug)

Maßnahme	Regret/no regret	Erläuterung	Relevanz	Erläuterung
Konservierende bodenschonende Bewirtschaftungsmethoden	No regret	Bereits heute bestehen Probleme im Bereich der Landwirtschaft aufgrund der Bodenerosionen	Need to have	Die konservierende Bodenbearbeitung stellt eine Hauptmaßnahme zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Verringerung der Bodenerosion dar. Es liegen positive Effekte auf andere Handlungsfelder vor, z. B. Wasserhaushalt.
Anpassung der Bewässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen	High regret	Die Maßnahme erschwert das Erreichen anderer Ziele, wie einen nachhaltigen Umgang mit Wasserressourcen	Nice to have	Bewässerung für den Anbau von speziellen Anbausorten notwendig. Durch den Anbau im eigenen Land ist eine gewisse Unabhängigkeit gegeben.
Einsatz angepasster Pflanzensorten	Low regret	Die Sorten erhöhen die Diversifizierung der Anbausorten und somit die biologische Vielfalt. Einschränkend können „alte“ Sorten verloren gehen.	Nice to have	Der Anbau von angepassten Pflanzensorten sichert die Erwerbsgrundlage der Landwirtschaft und trägt zur Sicherheit der Nahrungsversorgung bei.

Quelle: Tröltzsch et al. (2012).

Die konservierende Bodenbearbeitung stellt eine Anpassungsmaßnahme mit hohem Nutzen und vielfältigen Synergieeffekten wie den Hochwasserschutz durch Verbesserung der Infiltrationsrate in den Boden, die Verbesserung der Gewässerqualität durch geringere Nährstoffeinträge und die Erhöhung der biologischen Vielfalt dar. Die Synergieeffekte wurden nicht in die Nutzenrechnung übernommen. Eine Förderung zur Umsetzung der Maßnahme könnte eine Unterstützung der Investition in landwirtschaftliche Geräte wie z.B. Direktsaatmaschinen beinhalten. In Sachsen wird die Umstellung auf konservierende Bewirtschaftungsmethoden seit 1993 gefördert. Dort

stieg die konservierende und in Mulchsaat bewirtschaftete Ackerfläche zwischen 2000-2005 von 140.000 ha auf rund 246.000 ha an (Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2007). Durch die konservierende Bodenbearbeitung wurde eine Abschwächung der Ertragsrückgänge durch Trockenheit von 10 % angenommen. Die Kosten der Maßnahme waren dreimal so hoch wie der Nutzen, jedoch ist die Wirkung der Maßnahme langfristig (wenn gewünscht), zudem werden auch Kosten für die sogenannten „off-site damages“ durch Bodenerosion und deren Beseitigung vermieden (Tröltzsch et al., 2012).

Der Einsatz angepasster Pflanzensorten wie z. B. tiefwurzelnde und hitzeresistente Sorten stellt eine alternative Anpassungsmethode an Trockenheit im Sommer dar. Der Nutzung anderer Pflanzenarten und -sorten sind jedoch Grenzen gesetzt, da die Pflanzen- und Sortenwahl u. a. maßgeblich von den EU-Agrarsubventionen beeinflusst wird. Durch die Nutzung alternativer Pflanzen wurde ein Ertragsrückgang gegenüber heutigen Erträgen von 10 % angenommen. Auf der Kosten- seite bestehen Unsicherheiten insbesondere beim Fortschritt der landwirtschaftlichen Forschung zu Anbauprodukten, die gegenüber Hitze und Trockenheit resistenter sind. Sowohl die Kosten- als auch die Nutzenseite sind von Unsicherheiten bezüglich der Marktpreise für landwirtschaftliche Erzeugnisse betroffen. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Nutzen der Maßnahme ihre Kosten übersteigen (Tröltzsch et al., 2012).

14.4 Regionale Auswirkungen auf das Wassermanagement

Probleme können sich nicht nur durch zukünftig geringere zur Verfügung stehende Wassermengen, sondern auch durch zu hohe Wassermengen ergeben. In kleinen Flusseinzugsgebieten bestehen nach Extremsituationen wie Trockenheit und Starkniederschlag bereits heute Wassernutzungskonflikte von privater Wassernutzung, Naturschutz (Zustand angrenzender Feuchtgebiete) und Gewässerqualität. Nach Starkniederschlägen bestehen oftmals technische Probleme bei der Regenwasserableitung, vor allem in dicht besiedelten Gebieten. Bei den im Rahmen der Klimazug-Projekte dynaklim/InkaBB untersuchten Seen in Südbrandenburg sowie den Flüssen Lippe, Ems und Ruhr, ist mit einer sinkenden Gewässerqualität durch ein verringertes Wasserdargebot oder sinkende Wasserstände und/oder höheren Wassertemperaturen zu rechnen. In Folge von Trockenperioden sowie durch höhere Verdunstungsraten, ist zukünftig vor allem im Nordosten Deutschlands sowie im Nordosten Niedersachsens und im Süden und Westen Nordrhein-Westfalens mit sinkenden Grundwasserneubildungsraten zu rechnen (Heidt, 2009, Kaden, 2014; Kreins et al., 2015). Zu dem möglichen Maßnahmenkatalog für die Anpassung des Wassermanagements gehören eine gezielte Grundwasseranreicherung für trockene Gebiete, die Regulierung des Wasserhaushaltes durch Änderungen der Stauregulierung in entwässerten Gebieten zur Reduzierung des Wasserbedarfs in Trockenperioden (Dietrich et al., 2014), oder Anpassung der Steuerung der großflächigen Wasserregulierung durch Stauanlagen zur Minimierung von Nutzungseinschränkungen durch Hoch- und Niedrigwasserereignisse (Theobald et al., 2014).

14.5 Bewässerung und Wasserdargebot

In Bezug auf den Bedarf an Bewässerungswasser für die Landwirtschaft sind neben den steigenden Temperaturen vor allem zukünftige Änderungen der Niederschlagsmenge und -verteilung sowie veränderte Grundwasserneubildungsraten in Gebieten mit landwirtschaftlicher Produktion relevant. Bundesweit stammen 85 % des Wassers für Bewässerungszwecke aus Grund- und Quellwasser, weniger als 15 % stammt aus Oberflächengewässern in einigen Bundesländern. In den Bewässerungsgebieten Niedersachsens stammen rund 90 % des Zusatzwassers aus Grundwasserreservoirs, auf manchen Flächen wird auch eine Wasserentnahme aus dem Elbe-Seitenkanal praktiziert. Auch im Süden Deutschlands werden Oberflächengewässer zur Zusatzbewässerung genutzt (z. B. aus dem Rhein in Hessen oder aus dem Main-Donau-Kanal in Nordbayern). Dabei gilt es, den Zusatzwassereinsatz unter Beachtung der regionalen Wasserverfügbarkeit und der Erhaltung des Landschaftswasserhaushaltes heute und in Zukunft effektiv und umweltverträglich zu gestalten.

Die bereits heute bei manchen Grundwasserkörpern angespannte Bewässerungssituation könnte sich durch Folgen des Klimawandels wie u. a. sinkende Grundwasserneubildungsraten und höhere Verdunstungsraten von Pflanze und Boden in Folge steigender Temperaturen verschärfen. So wurde für die landwirtschaftlich genutzten Flächen Nordost-Niedersachsens durch das LBEG eine Zunahme der benötigten Bewässerungswassermenge von 30 % bis Ende des Jahrhunderts ermittelt (Heidt, 2009). Für die landwirtschaftlichen Flächen Nordost-Niedersachsens im Klimawandel besteht somit die Annahme, dass unter zukünftigen Bedingungen der Bewässerungsbedarf nicht mehr nur mit Grundwasser gedeckt werden kann, und dass auch Effizienzreserven nicht ausreichen werden (Schulz, 2014). Zur nachhaltigen Sicherung der Bewässerung bei gleichzeitiger Vermeidung einer weiteren Beeinträchtigung der Grundwasserkörper sowie zur Vorbeugung von Wassernutzungskonflikten, können mehrere Ansätze verfolgt werden. Für verschiedene Landkreise der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Gifhorn wurden dabei regional angepasste Lösungsansätze untersucht. Dies beinhaltete einerseits Ansätze zur Substitution von Grundwasser zur Bewässerung durch die verstärkte Nutzung von Oberflächengewässern oder die Nutzung von kommunalem wie industriellem Klarwasser. Andererseits wurden auch die Potenziale für eine verstärkte Grundwasserentnahme analysiert, oder eine Grundwasseranreicherung mit dem Ziel, höhere Entnahmemengen zu generieren.

14.6 Möglichkeiten der Grundwasseranreicherung und Entlastung von Grundwasserkörpern

Das Potenzial der Grundwasseranreicherung durch Forstumbau von Nadel- zu Laubwald oder die Versickerung von Klarwasser in einem Nadelwaldbestand wird aktuell innerhalb von Pilotprojekten der LWK Niedersachsen untersucht (Schulz, 2014). Ebenso wird der Einsatz von Prozessabwasser aus der Zuckerrübenverarbeitung erprobt. Dabei kann eine Verregnung von Klarwasser zum Wasserrückhalt beitragen und sich positiv auf den regionalen Wasserhaushalt auswirken. Für

das Verfahren der Klarwasserverregnung kommunaler Abwässer wird derzeit auf EU-Ebene eine Vereinheitlichung der rechtlichen Rahmenbedingungen angestrebt (siehe auch Kapitel 4). Dabei werden für eine sichere, die menschliche Gesundheit nicht gefährdende Nutzung von behandeltem Abwasser die Etablierung eines umfassendes Risikomanagementsystems sowie weitergehende Aufbereitungsschritte empfohlen, um Verunreinigungen z. B. mit Arzneimittlrückständen ausschließen zu können. Hierzu wird in einer Pilotanlage in Niedersachsen im Rahmen eines Projekts des IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung die Wirksamkeit einer Ultrafiltration in Kombination mit einem Flockungsprozess für die Klarwasserverregnung u. a. für die Bewässerung landwirtschaftlicher Kulturen ermittelt. Eine erneute Anpassung des historisch gewachsenen und etablierten, in Deutschland einmaligen Abwasserverregnungsverfahrens an gesetzliche Vorgaben wird auch auf den Abwasserverband Braunschweig (Kapitel 6) zukommen, wenn in 2027 der Einsatz von Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen endgültig verboten wird. Insgesamt kommt der Abwasserverregnung in Deutschland bisher eine eher untergeordnete Bedeutung zu, europa- und weltweit gesehen ist das Thema jedoch von großer Wichtigkeit (Seis et al., 2016).

Zur Entlastung der Grundwasserkörper wurden auch die Möglichkeiten einer höheren Wasser-Entnahmemenge aus dem Elbe-Seitenkanal in Verbindung mit dem Mittellandkanal begutachtet. Im Ergebnis sind höhere Entnahmemengen generell ohne Einschränkungen für die Schifffahrt möglich. Es würden jedoch eine höhere Pumpleistung und ein die verschiedenen Scheitelhaltungen ausgleichendes Pumpkettenmanagement benötigt werden, was mit der derzeitigen Reduzierung der Pumpkapazitäten nicht vereinbar wäre (Hohenrainer und von Eschenbach, 2014). In der Region Nürnberg/Fürth wird die Bewässerung der landwirtschaftlich genutzten Flächen im „Knoblauchsland“ mit 150 Mio. m³/Jahr Zusatzwasser aus der Zuleitung von Wasser aus dem Main-Donau-Kanal in die Regnitz gestützt. Der Kanal wurde als Wasserstraße zur Verbindung von Schwarzem Meer und Nordsee vor 25 Jahren gebaut. Der Bau führte zu erheblichen ökologischen Beeinträchtigungen im gesamten Baugebiet und blieb zudem deutlich hinter den ökonomischen Zielen zurück (Petschow et al., 1992). Vor der Errichtung neuer Überleitungssysteme sollte daher zuallererst die Ausschöpfung regionaler Wassernutzungspotenziale, einschließlich der Verbesserung der Wassernutzungseffizienz, geprüft und angestrebt werden. Wird dennoch eine Wasserüberleitung geplant, muss sie an den Grundsätzen einer ökologisch nachhaltigen Entwicklung ausgerichtet und unter aktiver Beteiligung aller Akteure auf lokaler, Landes- und Bundesebene ausgearbeitet werden (Dietrich et al., 2015).

14.7 Ausblick

Zur Bewertung von Anpassungsmaßnahmen wie der Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen besteht weiterer Bedarf für detaillierte Kosten-Nutzen-Rechnungen. Bisher stehen für eine differenzierte deutschlandweite, *regionalspezifische* Bewertung keine ausreichenden Daten zur Verfügung. Die mangelnde Datenverfügbarkeit macht Annahmen nötig und beschränkt die Zuverlässigkeit der Bewertungen. Je wichtiger die Bewässerung zukünftig wird, desto lohnender wird auch eine klare Differenzierung zwischen besonders bewässerungswürdigen und wenig bewässe-

rungswürdigen (Teil-)Flächen. Auch die Potenziale höherer Wassereffizienz, die sich aus einer Verbesserung in Form und Größe von Ackerschlägen ergeben, sollten ebenfalls als win-win-Strategie zum beidseitigen Vorteil von Landwirtschaft und Naturschutz weiter entwickelt werden (Schulz, 2012).

Die durch den menschengemachten Klimawandel seit 1850 beobachtete und weiter steigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre wirkt sich positiv auf das Pflanzenwachstum aus und verbessert gleichzeitig die Wassernutzungseffizienz. Quantitative Analysen zur Auswirkung höherer CO₂-Konzentrationen auf den Wasserhaushalt, eine potenziell erhöhte Wassereffizienz und die Erträge von ackerbaulichen Kulturen sind jedoch noch nicht in ausreichendem Maß vorhanden.

Die Akzeptanz für einen Ausbau der Bewässerungssysteme oder Erhöhung der Wasserentnahme für die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen kann, in Abhängigkeit der regionalen Wasservorräte und Nutzungskonkurrenz sehr unterschiedlich sein. Um in Hinblick auf zukünftige Veränderungen der Wasserverfügbarkeit und mögliche Nutzungskonflikte eine proaktive Handlungsweise zu erarbeiten, bedarf es eines frühzeitigen fachlichen Austauschs zwischen Forschungs- und Beratungseinrichtungen, der Verwaltung und der landwirtschaftlichen Praxis. Nur so können langfristig wirksame Lösungsansätze entwickelt werden.

Vor dem Hintergrund der für Deutschland beobachteten oder projizierten abnehmenden Niederschläge in den Haupt-Vegetationszeiten Frühjahr und Sommer, wird der Bewässerung eine immer größere Bedeutung zukommen. Da die Wasserentnahmen für landwirtschaftliche Nutzflächen bereits jetzt limitiert sind und vielen Nutzungsansprüchen genügen müssen, wird die Investition in effiziente Technik weiter an Bedeutung gewinnen. Auch potenzielle Ertragsvorteile durch die Bewässerung werden, in Kombination mit der Entwicklung der Agrarpreise, Investitionen in wasser- und energieeffiziente Verfahren mehr und mehr rechtfertigen.

Literatur

- Dietrich O, Schubert U, Schuler J, Zander P, Steidl J (2015) Wassermanagement in der Landwirtschaft, Projektbericht, ZALF Müncheberg
- Dietrich O, Fahle M, Steidl J (2014) Anpassung des Wassermanagements in stauregulierten Niederungsgebieten an zunehmende Wetterextreme-Möglichkeiten und Grenzen der Einflussnahme auf Wasserhaushaltsgrößen, In: Kaden S, Dietrich O, Theobald S (Hrsg.), *Wassermanagement im Klimawandel- Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen* KLIMZUG Band 3, 161-189, München, oekom Verlag
- De Groot R S, van Ierland E C, Kuikman P J, Nillesen E E M, Platteeuw M., Tassone V C, Verhagen A, Verzaandvoort S J E (2006) Climate adaptation in the Netherlands. Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven
- Heidt L (2009) Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens. *Geoberichte 13*, LBEG, Hannover

- Hohenrainer J, Ebner von Eschenbach A-D (2016) *Untersuchungen zu den Auswirkungen zusätzlicher Wasserentnahmen für die Feldberegnung aus dem Elbe-Seitenkanal und der Scheitelhaltung des Mittellandkanals*, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht BfG-1898
- Kaden S, Dietrich O, Theobald S (2014) Wassermanagement im Klimawandel- Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen, In: Kaden S, Dietrich O, Theobald S (Hrsg.), *Wassermanagement im Klimawandel – Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen* KLIMZUG Band 3, 487-506, München, oekom Verlag
- Köstner B, Lorenz M (2014) Klimafolgenszenarien für Agrarregionen und landwirtschaftliche Betriebe – Anwendung des Entscheidungshilfesystems LandCaRe-DSS. In: Bloch R, Bachinger J, Fohrmann R, Pfriem R (Hrsg.), *Land- und Ernährungswirtschaft im Klimawandel. Auswirkungen, Anpassungsstrategien und Entscheidungshilfen*, KLIMZUG Band 8, 325-344, München, Oekom-Verlag
- Kreins P, Henseler M, Anter J, Herrmann F und Wendland F (2015) Quantification of climate change impact on regional agricultural irrigation and groundwater demand, *Water resources management*, 29(10), 3585-3600
- Petschow U, Meyerhoff J, Einert D (1992) Ökonomisch-ökologische Bewertung der Elbekanalisation, Schriftenreihe des IÖW 53, 92
- Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (2007) Umweltgerechte Landwirtschaft 2005, Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung des Programms „Umweltgerechte Landwirtschaft—(UL)“ in der Förderperiode 2000 bis 2005, Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 1/2007, Dresden.
- Schulz E (2012) *AQUARIUS – Dem Wasser kluge Wege ebnen*. Projektbericht. LWK Niedersachsen (Hrsg), Hannover: <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/203/article/12396.html>
- Schulz, E (2014) Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung Teil 6: *Strategien zur Grundwasseranreicherung*, Projektbericht, LWK Niedersachsen, Hannover: <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/203/article/24920.html>
- Theobald S, Träbing K, Rötze A, Siglow A, Roland F, Bouillon C (2014) Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel in Nordhessen, In: Kaden S, Dietrich O, Theobald S (Hrsg.), *Wassermanagement im Klimawandel – Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen* KLIMZUG Band 3, 213-234, München, oekom Verlag
- Tröltzsch J, Görlach B, Lückge H, Peter M, Sartorius C (2012) *Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel*. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kosten-nutzen-von-anpassungsmaßnahmen-an-den>
- Seis W, Lesjean B, Maaßen S, Balla D, Hochstrat R, Düppenbecker B (2016) *Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung*, Umweltbundesamt (Hrsg), Dessau-Roßlau, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/rahmenbedingungen-fuer-die-umweltgerechte-nutzung>

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek
verzeichnet diese Publikationen
in der Deutschen National-
bibliografie; detaillierte
bibliografische Daten sind im
Internet unter
www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek
(German National Library) lists
this publication in the German
National Bibliographie; detailed
bibliographic data is available on
the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschie-
nene Bände finden Sie im Inter-
net unter www.ti.bund.de

Volumes already published in
this series are available on the
Internet at www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Schimmelpfennig S, Anter J, Heidecke C, Lange, S, Röttcher K, Bitt-
ner, F (eds) (2018) Bewässerung in der Landwirtschaft - Tagungs-
band zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Braun-
schweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 161 p, Thünen Work-
ing Paper 85, DOI:10.3220/WP1515755414000

Die Verantwortung für die
Inhalte liegt bei den jeweiligen
Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are
responsible for the content of
their publications.



Thünen Working Paper 85

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Deutschland

thuenen-working-paper@thuenen.de
www.thuenen.de

DOI: 10.3220/WP1515755414000
urn:urn:nbn:de:gbv:253-201801-dn059620-3